

Saphir A. Choudry

Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien

Saphir A. Choudry

Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien

Entwicklung einer Auswahlmethodik zur optimierten
Entscheidungsfindung im Karosseriebau



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

**Universitätsverlag Chemnitz
2019**

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://www.dnb.de> abrufbar.

Titelgrafik: Saphir A. Choudry
Satz/Layout: Saphir A. Choudry

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek
Universitätsverlag Chemnitz
09107 Chemnitz
<https://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag>

readbox unipress
in der readbox publishing GmbH
Am Hawerkamp 31
48155 Münster
<http://unipress.readbox.net>

ISBN 978-3-96100-101-9

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-353763>



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien

Entwicklung einer Auswahlmethodik zur optimierten
Entscheidungsfindung im Karosseriebau

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dr.-Ing.

Vorgelegt von: M.Sc. Saphir A. Choudry
Geboren am: 12. September 1990 in Gelnhausen

Tag der Einreichung: 16. Januar 2019
Tag der Verteidigung: 29. August 2019

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel
Prof. Dr.-Ing. Peter Mayr

Bibliografische Beschreibung

Choudry, Saphir Ahmad

Thema

Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien – Entwicklung einer Auswahlmethodik zur optimierten Entscheidungsfindung im Karosseriebau

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Chemnitz, 2019

180	Seiten
69	Bilder
33	Tabellen
132	Literaturzitate
2	Anlagen

Referat

Der Karosseriebau stellt einen der bedeutendsten Schritte in der Wertschöpfungskette moderner Fahrzeuge dar. Der Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe sowie Ausführungen derzeitiger Fahrzeugkarosserien führen zu neuen Karosseriekonzepten wie dem Multi-Material-Design. Die spezifischen Eigenschaften einzelner Werkstoffe stellen jedoch insbesondere für die Fügetechnik neue Herausforderungen dar. Dementsprechend steigt die Diversität der zur Auswahl stehenden Fügetechnologien zum Verbinden der Werkstoffkombinationen. Die Auswahl der einzusetzenden Fügetechnologie basiert grundsätzlich auf den Erfahrungen der Produktentwicklung. Wissenschaftliche Ansätze beschränken sich im Rahmen des Auswahlprozesses von Fügetechnologien oftmals auf die ökonomische Bewertung für einzelne Fügepunkte. Ein integrierter Bewertungsansatz, welcher bereits während der Festlegung von Werkstoff und Konstruktion die Aspekte der Fügetechnik hinsichtlich ökonomischer, ökologischer sowie technologischer Faktoren für eine gesamte Baugruppe umfasst, existiert bisher nicht. Aufgrund der Intransparenz hinsichtlich monetärer und nicht-monetärer Eigenschaften der jeweiligen Fügetechnologie sowie der zunehmenden Entscheidungskomplexität leitet sich der Bedarf nach einer methodischen Unterstützung des Auswahlprozesses ab. Ziel der Forschung ist es, durch die Entwicklung einer multidimensionalen Auswahlmethodik eine optimierte Entscheidungsfindung in der Karosserieentwicklung zu ermöglichen.

Schlagworte

Multidimensionale Bewertung, Fügetechnologien, Karosserieentwicklung, Transparenz, optimierte Entscheidungsfindung, nachhaltige und integrierte Entwicklung

Bibliographic Notes

Choudry, Saphir Ahmad

Title

Multidimensional Assessment of Joining Technologies – Development of a Selection Methodology for an Optimized Decision-making in Car Body Development

Doctoral thesis at the Faculty of Mechanical Engineering at Chemnitz University of Technology, Institute for Machine Tools and Production Processes, Chemnitz, 2019

180 pages
69 figures
33 tables
132 bibliographic references
2 appendices

Abstract

The car body shop has become one of the most significant steps in the automobile value chain nowadays. The usage of a variety of different materials and configurations of current vehicle bodies in lightweight construction leads to new body concepts such as the multi-material design. However, the specific properties of individual materials lead to new challenges, especially in the joining technology where existing technologies face numerous restrictions. Therefore, new joining processes are required, which also results in an increased diversity of joining technologies and complexity of the decision-making. To date, the selection of a joining technology for a component is mostly based on the experience of the product development. The selection process of extant scientific approaches, however, is often limited to the economic assessment of joining technologies for individual joints. An integrated assessment approach, which already includes the aspects of joining technologies with regards to economic, ecological and technological factors for an entire assembly during the definition of material and design, does not exist. Due to the non-transparency of the overall monetary and non-monetary impact of the respective joining technology, the need for a methodological support for the selection process is derived. An essential part of this research work is the development of a multidimensional selection methodology to allow an optimized decision-making in the early stage of car body development.

Keywords

Multidimensional assessment, joining technologies, car body development, transparency, optimized decision-making, sustainable and integrated development

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse der Technischen Universität Chemnitz in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik sowie der AUDI AG in Neckarsulm.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Welf-Guntram Drossel für die Bereitschaft zur Übernahme des Erstgutachtens. Bedanken möchte ich mich ebenso bei Herrn Prof. Peter Mayr für die Übernahme des Zweitgutachtens.

An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei den Mitarbeitern und Studenten der Abteilung Technologieentwicklung der AUDI AG für die freundliche und hilfsbereite Unterstützung bedanken. Ein besonderer Dank gilt dabei Steffen Müller, der mir die Bearbeitung des Projekts ermöglicht hat sowie Dr. Uwe Alber, der mich bei Fragen mit Rat und Tat stets unterstützt hat.

Mein Dank gilt auch Prof. Reinhard Mauermann, Dr. Frank Riedel sowie allen beteiligten Kollegen vom Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik und der Technischen Universität Chemnitz für die Unterstützung und die wertvollen Anregungen in den Zwischengesprächen.

Ganz herzlich bedanke ich mich bei Felix Ott und Jerome Kaspar für die kritische Durchsicht des Manuskripts und die konstruktiven Anregungen.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner lieben Familie und meinen Freunden für den steten Rückhalt und die Unterstützung bedanken.

Heilbronn, im Januar 2019

Saphir A. Choudry

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XVII
Abbildungsverzeichnis	XXI
Tabellenverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Aufbau der Arbeit	4
2 Stand der Technik und methodische Grundlagen	7
2.1 Einführung in den Karosseriebau	8
2.2 Besonderheiten von Fügetechnologien im Karosseriebau	9
2.3 Ansätze zur Bewertung von Fügetechnologien	12
2.3.1 Ökonomieorientierte Bewertungsansätze	12
2.3.2 Ökologieorientierte Bewertungsansätze	15
2.3.3 Technologieorientierte Bewertungsansätze	18
2.3.4 Multidimensionale Bewertungsansätze	20
2.3.5 Abgleich bewertungsspezifischer Anforderungen	21
2.4 Zwischenfazit: Ist-Situation und abgeleiteter Handlungsbedarf	25
3 Konzeption der Auswahlmethodik	27
3.1 Eingrenzung des Forschungsbereichs	28
3.2 Anforderungen an eine multidimensionale Auswahlmethodik	30
3.3 Darlegung des Grundkonzepts	31
3.3.1 Grundsätzlicher Aufbau der Methodik	31
3.3.2 Einordnung in den Produktentstehungsprozess	32
3.3.3 Normierung punkt- und linienförmiger Verfahren	34
3.4 Zwischenfazit: Grundkonzept der Auswahlmethodik	36
4 Entwicklung einer multidimensionalen Auswahlmethodik	39
4.1 Untersuchung der technologischen Realisierbarkeit von Fügetechnologien	40
4.2 Ökonomische Bewertung von Fügetechnologien	42
4.2.1 Entwicklung des Berechnungsmodells	43
4.2.2 Ermittlung ökonomischer Einflussfaktoren	45
4.2.3 Integration eines Sicherheitsmodells	54
4.2.4 Berechnung der ökonomischen Bewertungskennzahl	62
4.3 Ökologische Bewertung von Fügetechnologien	64
4.3.1 Definition der Ziele und des Untersuchungsrahmens	64
4.3.2 Sachbilanzierung: Ermittlung ökologischer Einflussfaktoren	68

4.3.3	Wirkungsabschätzung: Entwicklung des Berechnungsmodells . . .	74
4.3.4	Berechnung der ökologischen Bewertungskennzahl	79
4.4	Technologische Bewertung von Fügetechnologien	80
4.4.1	Charakterisierung technologischer Einflusskriterien	81
4.4.2	Entwicklung eines Evaluationsmodells	83
4.4.3	Entwicklung eines Gewichtungssmodells	86
4.4.4	Berechnung der technologischen Bewertungskennzahl	89
4.5	Ermittlung der ganzheitlich optimalen Handlungsempfehlung	92
4.5.1	Zusammenführung der Bewertungsdimensionen	92
4.5.2	Formulierung des Optimierungsprogramms	94
4.6	Identifikation werkstoff- und konstruktionsspezifischer Potentiale	101
4.6.1	Produktbeeinflussung durch Anpassung des Werkstoffs	102
4.6.2	Produktbeeinflussung durch Anpassung der Konstruktion	104
4.7	Zwischenfazit: Multidimensionales Konzept der Auswahlmethodik	105
5	Validierung und prototypische Umsetzung in einem Auswahlwerkzeug	109
5.1	Validierung der Auswahlmethodik	110
5.1.1	Darstellung des Anwendungsfalls	110
5.1.2	Exemplarische Anwendung der Auswahlmethodik	112
5.1.3	Analyse und Interpretation der Ergebnisse	128
5.2	Prototypische Umsetzung der Methodik in ein Auswahlwerkzeug	130
5.2.1	Integration des Auswahlwerkzeugs in den Entstehungsprozess . .	130
5.2.2	Architektur und Gestaltung des Auswahlwerkzeugs	132
5.3	Zwischenfazit: Bewertung und Diskussion des entwickelten Konzepts . .	137
6	Zusammenfassung und Ausblick	141
6.1	Zusammenfassung	142
6.2	Ausblick	143
	Literaturverzeichnis	145
	Anhang	153
	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	155

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AfA	Absetzung für Abnutzung
Al	Aluminium
Alu-WPS	Aluminium-Widerstandspunktschweißen
BT	Bauteil
CAD	Computer-Aided-Design
CATIA	Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application
CML	Centrum voor Milieukunde
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normierung
DK	Differenzkurve
EStG	Einkommensteuergesetz
EOP	End of Production
FÄ	Fügeäquivalente
FDS	Flow Drill Screw
FP	Fügepunkt
FT	Fügetechnologie
FTG	Fügetechnologie-Gruppe
FV	Fügeverbindung
GABI	Ganzheitliche Bilanzierung
GUI	Graphical User Interface
GWP	Global Warming Potential
HSN	Halbhohlstanznieten
i. O.	in Ordnung
IP	Integer-Problem
KEA	Kumulativer Energieaufwand
KTL	Kathodische Tauchlackierung
KI	Kosten-Index
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCP	Life Cycle Performance
LSS	Laserstrahlschweißen
LZK	Lebenszykluskosten
MADM	Multi Attribute Decision Making

MAG	Metall-Aktiv-Gas
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MCTR	Mean Cost to Repair
MDK	Materialdickenkombination
MIG	Metall-Inert-Gas
MIPS	Material-Input pro Serviceeinheit
MODM	Multi Objective Decision Making
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTR	Mean Time to Repair
NI	Nutzwert-Index
n.i.O.	nicht in Ordnung
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OR	Operations Research
PCF	Product Carbon Footprint
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PKW	Personenkraftwagen
RES	Reibelementschweißen
RG	Regressionsgerade
SI	Sustainability-Index
sLI	Strategischer Leistungs-Index
SOP	Start of Production
St	Stahl
TCO	Total Cost of Ownership
TE	Tausend Euro
TL	Technische Lieferbedingung
TPM	Total Productive Maintenance
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WBK	Waschen, Beizen, Konversionsbeschichten
WPS	Widerstandspunktschweißen

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Beschreibung
a_c, a'_c	Ursprüngliche bzw. neue Ranganzahl
a_j	Bereits vorhandene Systeme der FT j
A_j, A_l	Gesamtanzahl von Systemen der FT j bzw. der FTG l
$A_{j,k}^\xi$	Anzahl erforderlicher Systeme der FT j zum Setzen der FP-Wolke k
c^h	Klassengröße
C_L^Z	Anlagenkapazität des Reinigungsverfahrens L
CB_{ij}	Kosten-Nutzen-Index der FT j für FP i
d^m	Anzahl Arbeitstage im Monat m
d^t	Anzahl Arbeitstage im Jahr t
D^{tech}	Technische Anlageneinschaltdauer
E	Bindende Anforderungen
E_{ij}	Energiefluss der FT j für Teilprozess i
E_j, E_l	Entstehungskosten für die Systeme einer FT j bzw. FTG l
E_ϱ	Energieverbrauch für das Medium ϱ
f_c	Häufigkeit des Kriteriums c
f_j, f_l	Investitionskosten für ein System der FT j bzw. der FTG l
f^F	Funktion zur Ermittlung des Energiebedarfs während des Fügens
f^{PB}	Funktion zur Ermittlung des Energiebedarfs im produktionsfreien Zustand
f^Q	Prüfhäufigkeit
f^W	Funktion zur Ermittlung des Energiebedarfs während der Wartung
F	Anzahl zu fertigender Fahrzeuge
g^ψ	Unsicherheitsgewichtungsfaktor
G	Globale Anforderungen
G_m	Gesamtkosten für die Vorrichtung einer Station m
G^Q	Anzahl Prüfgeräte
G^S	Anzahl der Simulationsdurchläufe
GW_j	Technologischer Gesamtwert der FT j
$GW P_j$	Umweltauswirkungen der FT j
h_k	Anzahl Einspannvorgänge in Wolke k
K	Korrelationskoeffizient

K^P	Kosten für eine Vorrichtung punktförmiger Technologien
$K_L^{B,Z}$	Betriebskosten für das Reinigungsverfahren L
$K_L^{E,Z}$	Entstehungskosten für das Reinigungsverfahren L
K^X	Kostengruppe
K_β^{fix}	Fixer Anteil der Betriebskosten
K_β^{var}	Variabler Anteil der Betriebskosten
K^φ	Zusatzkosten für eine Vorrichtung linienförmiger Technologien
KI_{ij}	Kennzahl der ökonomischen Dimension von FT j für FP i
L	Lokale Anforderungen
LZK_j	Lebenszykluskosten der FT j
m^b	Durchschnittliches Platinengewicht eines Bauteils
m^{FT}	Steigung zur Ermittlung der normierten Nahtlänge
m^σ	Tatsächlicher Wert
M	Steigungsfaktor der linearen Funktion
M_{ij}	Kennzahl der monetären Bewertung von FT j für FP i
n^c	Anzahl der Kriterien
n_L^Z	Anlagennutzungsdauer des Reinigungsverfahrens L
N_{ij}	Kennzahl der nicht-monetären Bewertung von FT j für FP i
$NI_{i,j}$	Kennzahl der technologischen Dimension von FT j für FP i
p^{KI}, p^{SI}, p^{NI}	Präferenzkoeffizienten
P	Prüfsumme des paarweisen Vergleichs
P_{ij}^F	Leistung eines Systems der FT j zum Fügen eines Teilprozesses i
P_j^{PB}	Leistung eines Systems der FT j im produktionsbereiten Zustand
P_j^{SB}	Standby-Leistung eines Systems der FT j
$P(r_c, x_{cj})$	Straffunktion für das Kriterium c der FT j
r	Kalkulationszinssatz
r_c, r'_c	Ursprüngliche bzw. neue Rangfolge des Kriteriums c
r_i^I	Indikator für Ressourcenherstellung des Teilprozesses i
R_{ij}	Ressourcenfluss der FT j für Teilprozess i
$R(r_c, x_{cj})$	Belohnungsfunktion für das Kriterium c der FT j
s	Steuersatz
s^I	Indikator für Stromherstellung
sLI_{ij}	Kennzahl der multidimensionalen Bewertung von FT j für FP i
S	Anzahl Schichten
SI_{ij}	Kennzahl der ökologischen Dimension von FT j für FP i
SP^{min}, SP^{max}	Minimaler bzw. maximaler Skalenwert
t	Jahr
T	Abschreibungszeitraum bzw. Projektdauer
v_{cj}	Maßzahl der FT j für das Kriterium c
V_j	Variable Kosten zum Fügen von einem FP i mit FT j
w_c	Normierter Gewichtungsfaktor für das Kriterium c

W_j	Verwertungskosten von einer FT j
w_j^1	Veräußerungsanteil der FT j
w_j^2	Verschrottungsanteil der FT j
w_j^3	Verkaufsanteil der FT j
w_Z^σ	Modellierter Wert
x_{cj}	Normalisierte Skalierungspunkte für das Kriterium c der FT j
x_j	Referenznahtlänge der FT j
X^{korr}, Y^{korr}	Korrelierende Zufallszahlen
y_j	Festigkeit der FT j
z_l	Anzahl Systeme von FT-Gruppe l mit vollem Preis
Z^σ	Prognosehäufigkeit

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Beschreibung
α	Konstante Lernrate
β^E	Energiekosten
β^{IH}	Instandhaltungskosten
$\beta^{IH,P}$	Personalkostensatz für Instandhaltungstätigkeiten
β^M	Hilfsstoffkosten
β^P	Personalkosten
β^Q	Prüfkosten
$\beta^{Q,G}$	Prüfgerätekosten
$\beta^{Q,P}$	Personalkostensatz für Prüftätigkeiten
β^Z	Werkstoffvorbereitungskosten
β^ϖ	Ersatzteilkosten
β_{jw}^1	Relativer Verschrottungswert der FT j
β_{jw}^2	Relativer Verkaufswert der FT j
β_L^Z	Werkstoffvorbereitungskosten für das Reinigungsverfahren L
β_P^m	Passivierungskosten je Kilogramm
β_P^Z	Werkstoffvorbereitungskosten für den Passivierungsvorgang P
β_g^E	Energiekostensatz für das Medium g
δ^b	Anzahl FP pro Bauteil bzw. MDK
δ_t	Jährliche bzw. ideale Ausbringungsmenge
ε	Erfahrungskurveneffekt
η_j^{frei}	Freie Kapazitäten eines Systems der FT j
$\theta(r_c, x_{cj})$	Ausschlussfunktion für das Kriterium c der FT j
κ	Max. Anzahl an Systemen pro Station m
λ	Einsparfaktor durch Skalierungseffekte

μ	Erwartungswert
μ^G	Gleichheitsfaktor
σ^*	Angepasste Standardabweichung
τ^E	Einspannzeit einer MDK
τ^{ES}	Einschaltdauer einer Schicht
τ_j^f	Prozesszeit zum Fügen eines FP
τ_j^{IH}	Instandhaltungszeit der FT j
τ_j^v	Verfahrzeit des Werkzeugs zwischen zwei FP
τ^G	Gesamtzeit an einem Tag
τ_k^S	Sperrzeit für Fügepunkt-Wolke k
τ^Q	Prüfzeit
$\tau^{Q,S}$	Prüfzeit pro Schicht
τ^Z	Taktzeit
ϕ_t	Abschreibungseffekt für das Jahr t
ψ_j	Bewertungsfunktion für quantitative Unsicherheiten der FT j
Ω_ϖ	Wartungsintervall für die Instandhaltungstätigkeit ϖ

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einfluss des Leichtbaus auf den Karosseriebau	3
1.2	Grafische Gliederung der Dissertation	4
2.1	Prozesskette der Automobilfertigung	8
2.2	Bestandteile des Leichtbau-Trials	9
2.3	Einteilung der Fertigungs- und Fügeverfahren	10
2.4	Einflussfaktoren bei der Auswahl von Füge Technologien	11
2.5	Eisbergmodell der Lebenszykluskosten	13
2.6	Phasen einer Ökobilanz	16
3.1	Eingrenzung des Forschungsbereichs der Methodik	28
3.2	Entscheidungsträger im Rahmen der Technologieauswahl	29
3.3	Grundsätzlicher Aufbau der Auswahlmethodik	32
3.4	Bewertungsstufen während des Produktentstehungsprozesses	33
3.5	Einheitliche Probengeometrie zur Ermittlung der Scherzugkräfte	35
3.6	Ermittlung der Referenznahlänge über die Scherzugfestigkeit	36
4.1	Grundsätzlicher Aufbau der multidimensionalen Auswahlmethodik	39
4.2	Ablauf des Screening-Modells	40
4.3	Vorgehen bei der Entwicklung der ökonomischen Bewertungsmethodik	42
4.4	Einflussfaktoren auf die ökonomische Bewertung von Füge Technologien	46
4.5	Beistellumfänge je Integrationsstufe	47
4.6	Vorgelagerte Prozesse einzelner Füge Technologien	52
4.7	Ausschnitt der Lebenszykluskosten von Füge Technologien	54
4.8	Vorgehensweise zur Entwicklung des Unsicherheitsmodells	54
4.9	Historische Entwicklung unsicherer Einflussfaktoren	56
4.10	Schwachstelle zur Berechnung der standardmäßigen Volatilität	58
4.11	Simulationsergebnisse einzelner Einflussfaktoren	59
4.12	Schematischer Aufbau des Simulationsmodells	59
4.13	Beispielhafte Sensitivitätsanalyse einzelner Einflussfaktoren	60
4.14	Gesamtergebnis der Monte Carlo Simulation	61
4.15	Vorstellung der Kosten-Unsicherheit-Matrix	63
4.16	Adaption der Ökobilanzierung	64
4.17	Systemabgrenzung Produkt- und Prozessbilanz	65
4.18	Identifikation der Einflusskriterien für eine ökologische Bewertung	67
4.19	Zusammenhang zwischen funktioneller Einheit und Bedarf	68
4.20	Relevante Einflussfaktoren für die Erstellung der Sachbilanz	69
4.21	Aufbau und Erstellung der Energiereferenzzyklen	70
4.22	Blockschaltbild einer Referenzzelle am Beispiel des Stanznietens	71
4.23	Schematische Darstellung einer Produktionsphase	72
4.24	Schematischer Prozessablauf am Beispiel der Füge Technologie WPS	74

4.25	Berechnung und Klassifizierung der Umweltbelastungen	75
4.26	Quantifizierung und Modellierung der Energie- und Ressourcenflüsse . .	77
4.27	Ermittlung der Anlagenbedarfe	77
4.28	Zusammensetzung des GWP für die Herstellung einer Fügeverbindung .	79
4.29	Klassen der Einflusskriterien	83
4.30	Evaluation quantitativer sowie qualitativer Einflussfaktoren	84
4.31	Darstellung der Transformationsfunktionen	86
4.32	Ergebnisse des paarweisen Vergleichs	88
4.33	Effekt der Belohnungs-, Straf- sowie Ausschlussfunktion	91
4.34	Zweidimensionales Bewertungsportfolio für Füge Technologien	93
4.35	Effekt der Sprungfixkosten	94
4.36	Ablauf der Optimierung	95
4.37	Darstellung von Fügepunkt-Wolken in einer Baugruppe	96
4.38	Ablauf der werkstofforientierten Produktbeeinflussung	103
4.39	Ablauf der konstruktionsorientierten Produktbeeinflussung	105
4.40	Ablauf der Auswahlmethodik	107
5.1	Überblick des Unterbodens anhand einer Explosionsdarstellung	110
5.2	Schematisches Anlagenlayout des Ist-Zustands	112
5.3	Wahrscheinlichkeitsverteilung der LZK unter Risiko	117
5.4	Zusammenführung der Bewertungsergebnisse der einzelnen Dimensionen	121
5.5	Schematisches Anlagenlayout des Soll-Zustands (vor Potential-Modell) .	125
5.6	Anpassung des Anwendungsfalls: erste Optimierung	126
5.7	Anpassung des Anwendungsfalls: zweite Optimierung	126
5.8	Schematisches Anlagenlayout des Soll-Zustands (nach Potential-Modell)	127
5.9	Kostenentwicklung von FT A und FT D	129
5.10	Schematischer Ablauf der Technologieauswahl	131
5.11	Architektur des Auswahlwerkzeugs	132
5.12	Startseite des Auswahlwerkzeugs	133
5.13	Eingabemaske für ökonomische und ökologische Einflussfaktoren	134
5.14	Eingabemaske für technologische Einflussfaktoren	135
5.15	Ausgabemaske zur Darstellung der Bewertungsergebnisse	137

Tabellenverzeichnis

2.1	Ausschnitt relevanter Fügetechnologien im Karosseriebau	11
2.2	Abgleich der Anforderungen mit den vorhandenen Forschungsansätzen	24
4.1	Beispiel einer Zuordnungstabelle nach dem <i>Screening-Prozess</i>	42
4.2	Ausschnitt von Prüfaufwendungen für Fügetechnologien	49
4.3	Berechnung der Prüfhäufigkeit pro Schicht	50
4.4	Unsichere Einflussfaktoren in Abhängigkeit ihrer Beeinflussbarkeit	55
4.5	Auswahl und Zuordnung der definierten MDKs	70
4.6	Definition der Komponenten für den Prüfaufbau	72
4.7	Definition der Betriebszustände einer Anlage für den Energierferenzzyklus	73
4.8	Exemplarischer Ablauf des Prüfzyklus	73
4.9	Ausschnitt verwendeter Indikatoren für die Wirkungsabschätzung	76
4.10	Exemplarische Darstellung der Kennzahl <i>SI</i> über die funktionelle Einheit	80
4.11	Ausschnitt des paarweisen Vergleichs	87
4.12	Optimierungs-Modell: Notation verwendeter Variablen	97
4.13	Exemplarische Bewertung einer Fügeaufgabe	101
4.14	Auszug aus dem Werkstoffkatalog	102
4.15	Auszug aus dem Konstruktionskatalog	104
5.1	Anzahl der Fügepunkte für das Verbinden der einzelnen Komponenten	111
5.2	Schematischer Ausschnitt der definierten Kernprämissen	113
5.3	Schematischer Ausschnitt der relevanten Anforderungen	113
5.4	Abgleich der Anforderungen mit den definierten Kernprämissen	114
5.5	Allgemeine Annahmen für den Anwendungsfall	115
5.6	Validierung der ökonomischen Bewertung unter Risiko	116
5.7	Validierung der ökologischen Bewertung	118
5.8	Validierung der technologischen Bewertung	120
5.9	Zuordnung der Fügetechnologie zu der FTG	122
5.10	Ausschluss von Fügetechnologien	122
5.11	Ausschnitt des nicht-monetären Indexes	122
5.12	Zuordnung der Fügepunkte zu den FP-Wolken	123
5.13	Zuordnung der Fügepunkt-Wolken zu den Stationen	123
5.14	Berücksichtigung der Anzahl an Fügesystemen	124
5.15	Ausschnitt der Berechnungsgrundlage	124
5.16	Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse	128

Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methodik zur Auswahl von Fügetechnologien entwickelt. Hierzu thematisiert folgendes Kapitel die Ausgangssituation sowie die Motivation für die Entwicklung einer Auswahlunterstützung. Basierend auf den identifizierten Herausforderungen wird anschließend die Zielsetzung der Forschung formuliert sowie der weitere Aufbau der Arbeit dargelegt.

1.1 Ausgangssituation

Fertigungsunternehmen sind aufgrund der beschleunigten Umweltveränderungen innerhalb der letzten Jahre einem anspruchsvolleren Wettbewerb ausgesetzt (Pieverling, 2003). Dies kann zum einen auf die Globalisierung und zum anderen auf den technologischen Fortschritt, der trotz steigender Produktkomplexität und -anforderungen immer kürzere Produktlebenszyklen aufweist, zurückgeführt werden (Abele & Reinhart, 2011). Um auf die gestiegenen Herausforderungen reagieren zu können, setzen Unternehmen im Rahmen der Produktentwicklung vermehrt Methoden wie beispielsweise das Simultaneous oder Concurrent Engineering ein, um Planungs- und Entwicklungsprozesse möglichst überlappend oder parallel anzuordnen bzw. zusammenzuführen und somit im Vergleich zu der sequentiellen Abarbeitung eine frühzeitigere Verifikation der Produkthanforderungen zu ermöglichen (Stephan, 2007).

Ein Fachgebiet, welches hinsichtlich der integrierten Auslegung von Planungs- und Entwicklungsschritten hohes Optimierungspotential aufweist, ist die Karosserieentwicklung (Stephan, 2007). Die Fertigung einer Karosserie stellt mit einem Automatisierungsgrad von bis zu 90 Prozent einen wesentlichen Teil der automobilen Prozesskette dar (Wemhöner, 2006; Bornschlegl, 2016). Dabei müssen sich Hersteller aktuell neben dem wachsenden Wettbewerb sowie der steigenden Kosten für Ressourcen insbesondere den strikteren Umweltvorschriften stellen (Europäische Union, 2012).¹ Währenddessen steigen die Kundenanforderungen an ein heutiges Kraftfahrzeug hinsichtlich Sicherheit und Komfort, welche grundsätzlich mit zunehmendem Fahrzeuggewicht verbunden sind und somit mit den gesetzlich immer strenger werdenden Emissionsvorgaben konkurrieren (VDA, 2017; Friedrich, 2013). Daher sind zur Lösung des vorliegenden Zielkonflikts verschiedene Ansätze entwickelt worden, die in der Automobilindustrie immer mehr Anwendung finden. Besonders vielversprechende Lösungsansätze stellen dabei elektrische Antriebskonzepte sowie innovative Leichtbaukonstruktionen oder eine Kombination beider dar. Da eine Karosserie den größten Einfluss auf das Fahrzeuggewicht ausübt, steht der Leichtbau insbesondere aufgrund des Trends hinsichtlich E-Mobilität im Fokus, um eine Umkehrung der stetigen Zunahme der Fahrzeuggesamtmasse zu erzielen (Meschut, Janzen & Olfermann, 2014).² Durch die zunehmende Werkstoffvielfalt stößt die seither eingesetzte Fügetechnik jedoch an ihre Grenzen. Daher sind neue Fügetechnologien erforderlich, um die Potentiale des Leichtbaus optimal ausschöpfen zu können (Meschut et al., 2014). Als Schlüsseltechnologie des Karosseriebaus ist die eingesetzte Fügetechnologie primär von den Anforderungen der Fügestelle und des eingesetzten Werkstoffs abhängig (Friedrich, 2013). Folglich erhöht sich die Anzahl der Fügetechnologien, wie in Abbildung 1.1 exemplarisch aufgezeigt.

¹ In der vorliegenden Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit ausschließlich die männliche Form verwendet. Dies impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein.

² Der Effekt mit der stetigen Zunahme der Fahrzeuggesamtmasse wird in der Literatur mit der „Gewichtsspirale“ aufgezeigt (Friedrich, 2013).

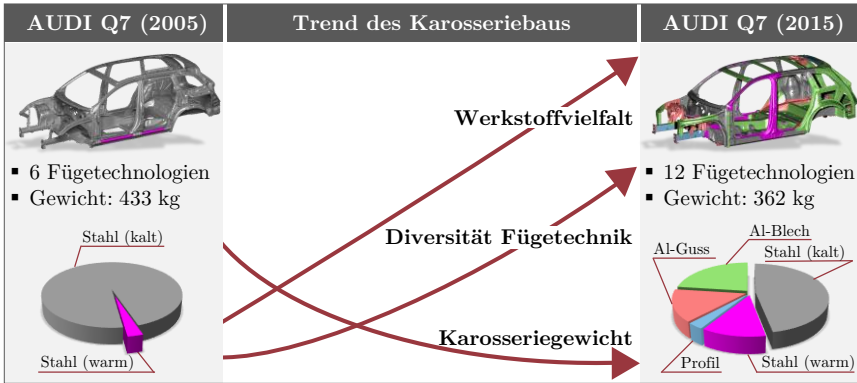


Abbildung 1.1: Einfluss des Leichtbaus auf Werkstoff, Konstruktion und Fügetechnik im Karosseriebau am Beispiel des AUDI Q7 in Anlehnung an Alber (2015)

Die Auswahl der für den jeweiligen Anwendungsfall einzusetzenden Fügetechnologie basiert bisher, unter Berücksichtigung der bereits spezifizierten Werkstoffkombinationen und Konstruktion, auf den Erfahrungen und Einschätzungen der Produktentwicklung (Prüß, Stechert & Vietor, 2010). Ein multidimensionaler Bewertungsansatz, welcher im Rahmen der Entscheidungsfindung neben ökonomischen auch ökologische und technologische Einflussfaktoren umfasst, existiert für Fügetechnologien bisher nicht. Des Weiteren finden integrierte Produktentwicklungsansätze, wie beispielsweise das Concurrent Engineering oder Design to Cost, die bereits während des Festlegens von Werkstoff und Konstruktion die Auswahl der Fertigungstechnik beeinflussen, bisher keine konsequente Berücksichtigung (Kaspar, Choudry & Vielhaber, 2018; Werner, 1997).

Wissenschaftliche Ansätze liefern zahlreiche Modelle zur Bewertung von Fügetechnologien, die sich allerdings oftmals auf maximal zwei Dimensionen beschränken und von einer umfassenden Datenverfügbarkeit ausgehen. Jedoch sind insbesondere in der frühen Phase des Entstehungsprozesses zahlreiche Projektparameter noch nicht konkretisiert und mit Unsicherheiten verbunden (Choudry, Kaspar, Alber & Landgrebe, 2018). Berechnungsmodelle werden somit vor die Herausforderung gestellt, trotz fehlender Informationen eine Bewertung vorzunehmen. Dazu liefert bisher kein Ansatz eine praktikable Lösung.

Aufgrund der Intransparenz hinsichtlich des monetären sowie nicht-monetären Einflusses der jeweiligen Fügetechnologie für eine Fügeaufgabe leitet sich der Bedarf nach einer methodischen Unterstützung eines Auswahlprozesses für Fügetechnologien ab. Dabei ist das Ziel der Auswahlmethodik, durch die multidimensionale Bewertung eine transparente und optimierte Entscheidungsfindung in der Karosserieentwicklung zu ermöglichen. Die Aufgabenstellung wird für Fügetechnologien im automobilen Karosseriebau bearbeitet, soll jedoch auch eine Übertragbarkeit auf andere Fertigungsbereiche gewährleisten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Abbildung 1.2 zeigt die grafische Gliederung der Dissertation sowie die im Rahmen des Forschungsprojekts entstandenen Publikationen zu den einzelnen Themenbereichen.

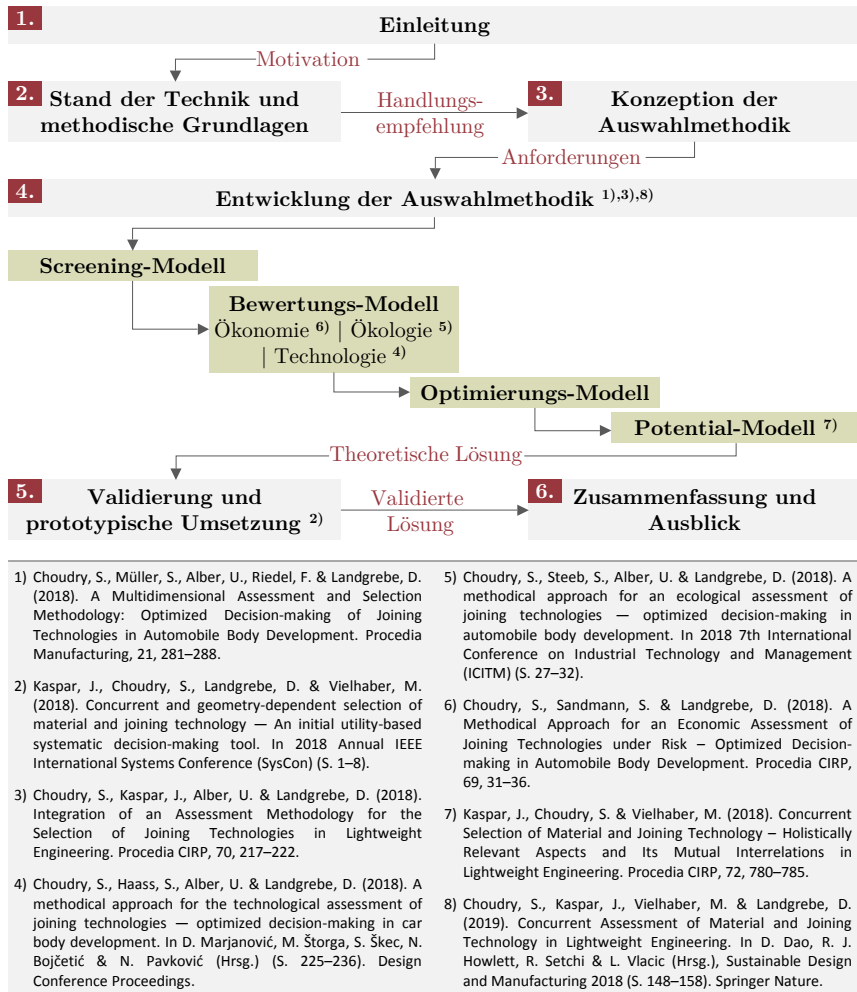


Abbildung 1.2: Grafische Gliederung der Dissertation sowie die im Rahmen des Projekts entstandenen Publikationen zu den einzelnen Themenbereichen

Die Arbeit setzt sich aus insgesamt sechs Kapiteln zusammen. Nach der thematischen Einordnung der Arbeit im ersten Kapitel verleiht das zweite Kapitel einen Überblick über die theoretischen Grundlagen, die für das Verständnis der Thematik herangezogen werden können. Dabei wird näher auf den Karosserieleichtbau in der Automobilindustrie und auf die Aspekte der multidimensionalen Bewertung eingegangen. Hierfür werden bisherige Ansätze im Rahmen einer Literaturrecherche untersucht und mit den bewertungsspezifischen Anforderungen abgeglichen. In dem dritten und vierten Kapitel erfolgt die Konzeptionierung und Entwicklung der Auswahlmethodik. Hierzu wird zunächst eine Eingrenzung des Forschungsbereichs vorgenommen sowie die grundlegenden Anforderungen an eine Auswahlmethodik abgeleitet, bevor eine Detaillierung der einzelnen Komponenten erfolgt. Die Validierung und Umsetzung der Methodik wird im fünften Kapitel behandelt. Für die Validierung wird ein exemplarischer Anwendungsfall aus der Praxis herangezogen, bevor die prototypische Umsetzung der Methodik in Form eines prototypischen Softwarewerkzeugs vorgestellt wird. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der erzielten Erkenntnisse und einem Ausblick hinsichtlich potentiell zukünftiger Forschungen ab.

Stand der Technik und methodische Grundlagen

Das folgende Kapitel befasst sich mit dem Stand der Technik sowie den methodischen Grundlagen, welche für die weiteren Ausführungen im Rahmen dieser Arbeit erforderlich sind. Um einen Überblick über den Karosseriebau in der Automobilindustrie zu verleihen, erfolgt zunächst eine kurze Einführung in den Karosseriebau, in der die verschiedenen Leichtbaustrategien und -konzepte vorgestellt werden. Im Anschluss daran wird auf die Besonderheiten von Fügetechnologien im Karosseriebau eingegangen, um potentielle Einflussgrößen sowie Anforderungen bei der Auswahl von Fügetechnologien zu identifizieren. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgt abschließend eine Diskussion sowie ein Abgleich bereits existierender Ansätze mit den zuvor identifizierten Anforderungen zur Bewertung von Fügetechnologien.

2.1 Einführung in den Karosseriebau

Die klassische Fertigung eines Automobils kann grundsätzlich in vier Gewerke aufgeteilt werden. Abbildung 2.1 stellt den Herstellungsprozess eines Automobils schematisch dar. Die im Presswerk geformten und geschnittenen Blechteile werden im Karosseriebau mithilfe von Industrierobotern zu einer Karosserie zusammengesetzt, welche in einem Automobil die größte Komponente darstellt (Elend, 2012). In der Lackiererei erhalten die Karosserien anschließend eine gegen Korrosion schützende Grundierung sowie einen Deck- und Klarlack. Schlussendlich erfolgt in der Montage der Zusammenbau mit allen weiteren Komponenten, wie der Innenausstattung oder dem Fahrwerk, zu einem fertigen Fahrzeug.



Abbildung 2.1: Prozesskette der Automobilfertigung in Anlehnung an Klug (2010)

Der Einsatz von Fügetechnologien beschränkt sich im Automobilbau auf den Karosseriebau, um aus einer Vielzahl verschiedener Einzelteile eine geschlossene Einheit zu fertigen. In der vorliegenden Arbeit kann daher der Untersuchungsbereich auf den Karosseriebau eingegrenzt werden. Der Karosseriebau definiert maßgeblich die Außenhaut sowie das Erscheinungsbild des Automobils und wird daher als eine wesentliche Kernkompetenz eines Automobilherstellers gesehen. Dabei können als primäre Anforderungen an die Karosserieentwicklung neben einer maximalen Sicherheit für die Insassen, ein hoher Fahrkomfort sowie ein ansprechendes Design abgeleitet werden (Braess & Seiffert, 2013). Durch steigende Kundenanforderungen an die Ausstattung eines Fahrzeugs nimmt jedoch das Fahrzeuggewicht zu (Roth, Clark & Kelkar, 2001). Dieses wiederum wirkt sich negativ auf andere Fahrzeugmerkmale aus, wie z. B. eine verringerte Beschleunigungsleistung des Fahrzeugs, eine Verlängerung des Bremsweges oder einen erhöhten Kraftstoffverbrauch. Die Karosserie stellt mit einem Gewichtsanteil von 20 bis 30 Prozent einen wesentlichen Bestandteil des Fahrzeugesamtgewichts dar, woraus sich ein entsprechend hohes Optimierungspotential zur Gewichtsreduzierung im Karosseriebau ableiten lässt (Friedrich, 2013; Roth et al., 2001). Intensiviert durch den Trend bzw. die strengeren gesetzlichen Vorgaben der letzten Jahre zu umweltbewussteren Produkten, hat sich der Leichtbau zu einem der bedeutsamsten Aspekte in der Fahrzeugentwicklung entwickelt. Die Leichtbauweise ist eine Konstruktionsphilosophie, die eine maximale Gewichtseinsparung zum Ziel hat (Braess & Seiffert, 2013). Hierzu kann der in Abbildung 2.2 beschriebene Leichtbau-Triolog nach Friedrich (2013) herangezogen werden, der eine ganzheitliche Betrachtung von Werkstoff, Bauweise und Fertigungsverfahren vornimmt. Der Bestandteil Werkstoff umfasst dabei im automobilen Karosseriebau neben Stahl vermehrt Aluminium sowie partiell Faserverbundwerkstoffe und Magnesium (Hänle, Kalke, Lehnert & Seethaler, 2002). Durch den Einsatz der verschiedenen Werkstoffe ergeben

sich verschiedene Bauweisen, wie u. a. die Stahl- und Aluminiumleichtbauweise sowie die Mischbauweise (Friedrich, 2013). Die Fertigungsverfahren dienen zur Umsetzung der verschiedenen Bauweisen und umfassen nach DIN 8580 (2003) neben dem Fügen weitere Verfahren, wie beispielsweise das Umformen oder Trennen.

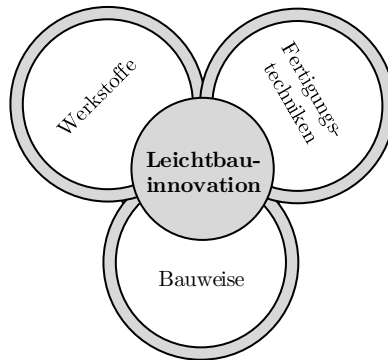


Abbildung 2.2: Bestandteile des Leichtbau-Triologs in Anlehnung an Friedrich (2013)

Die drei Bestandteile stehen somit in einer Wechselbeziehung zueinander und bilden den Schlüssel zu neuen und verbesserten Leichtbaustrukturen (Henning & Moeller, 2011). Für eine zielgerichtete Anwendung der drei Bereiche existieren diverse Leichtbaustrategien. Dabei kann zwischen fünf Grundstrategien unterschieden werden: dem Stoff-, Fertigungs-, Form-, Konzept- sowie Bedingungsleichtbau (Braess & Seiffert, 2013).¹

2.2 Besonderheiten von Fügetechnologien im Karosseriebau

Fertigungsverfahren, die einer der drei Bestandteile des Leichtbau-Triologs und den Forschungsschwerpunkt dieser Arbeit bilden, werden nach DIN 8580 (2003) in sechs Hauptgruppen unterteilt (Abbildung 2.3). Die Hauptgruppen unterscheiden sich durch die Art der Änderung des Stoffzusammenhalts bzw. der Stoffeigenschaft und lassen sich je nach Verfahrensprinzip in weitere Untergruppen aufteilen. Fügetechnologien sind in der Hauptgruppe 4 zusammengefasst und werden durch die DIN 8593 (2003) weiter charakterisiert; die für den Karosseriebau relevanten Verfahren sind in Abbildung 2.3 farblich hervorgehoben.

Mit dem Begriff Fügen wird das Zusammenbringen mehrerer Werkstücke bezeichnet. Das Fügen kann dabei auf verschiedenen Wirkprinzipien basieren (DIN 8580, 2003).

¹ Eine detaillierte Erläuterung der Strategien ist für die vorliegende Arbeit nicht zielführend, daher sei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen; eine umfassende Erläuterung bzgl. der verschiedenen Leichtbaustrategien kann unter anderem den Werken von Braess und Seiffert (2013) sowie Friedrich (2013) entnommen werden.

Unter Wirkprinzipien wird die Art des Zusammenhalts verstanden, welche von dem Bindemechanismus zwischen den Energiearten und Verbindungselementen abhängig ist. Hierbei wird zwischen Stoff-, Form- und Kraftschluss unterschieden (Awiszus, Bast, Dürr & Matthes, 2009). Ein Ausschnitt der für den Karosseriebau relevanten Füge Technologien ist Tabelle 2.1 zu entnehmen, welche mechanischen, thermischen oder chemischen Fügeverfahren zugeordnet werden können.²

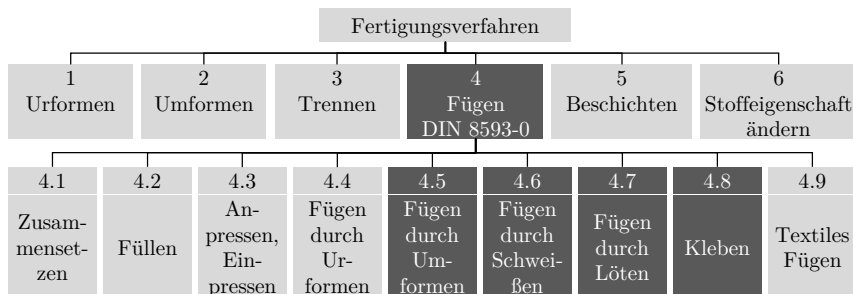


Abbildung 2.3: Einteilung der Fertigungs- und Fügeverfahren nach DIN 8593 (2003)

Der bedingte Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe, um den Anforderungen an Gewicht und Design zu genügen, und die daraus resultierende Komplexität im Karosseriebau stellt die Füge Technik vor eine beträchtliche Herausforderung. Daher stoßen konventionelle Füge Technologien immer häufiger an ihre Grenzen. Um das von der Automobilindustrie angesetzte Bestreben des Leichtbaus weiterhin zu verfolgen, werden stetig neue Verbindungstechnologien für eine Anwendung in dem Karosseriebau entwickelt. Dementsprechend hat die Füge Technik eine immense Bedeutung im gesamten Entwicklungsprozess.

Die Auswahl der Füge Technologie hängt jedoch von verschiedenen Einflussfaktoren ab, welche den drei Dimensionen *Ökonomie*, *Ökologie* sowie *Technologie* zugeordnet werden können (Henning & Moeller, 2011; Choudry, Müller, Alber, Riedel & Landgrebe, 2018). Hierbei handelt es sich um ein multidimensionales Bewertungsproblem, welches neben monetären (*Ökonomie*) auch nicht-monetäre (*Ökologie*, *Technologie*) Faktoren umfasst.³ Der Abbildung 2.4 kann ein Ausschnitt relevanter Einflussfaktoren für die Auswahl von Füge Technologien im Karosseriebau entnommen werden. Um eine optimierte Entscheidungsfindung ermöglichen zu können, ist daher eine ganzheitliche Berücksichtigung aller Dimensionen mit den dazugehörigen Einflussfaktoren erforderlich.

² Für eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Füge Technologien sei an dieser Stelle auf die Werke von Braess und Seiffert (2013) und Friedrich (2013) verwiesen.

³ In der Literatur wird bei Investitionsentscheidungen häufig zusätzlich die Dimension *Strategie* diskutiert. Für Füge Technologien ist jedoch eine direkte Berücksichtigung strategischer Faktoren nicht zielführend, da strategische Vorgaben für Füge Technologien im Karosseriebau üblicherweise monetär quantifizierbar sind und somit letztendlich der ökonomischen Dimension zugeordnet werden können. Daher wird diese Dimension im Rahmen dieser Arbeit nicht isoliert behandelt.



Abbildung 2.4: Einflussfaktoren bei der Auswahl von Füge-technologien

Jedoch existiert aktuell keine ausreichende Datenbasis bzw. kein standardisiertes Vorgehen, um eine multidimensionale Auswahl von Füge-technologien zu ermöglichen. Die Entscheidungsfindung in der Karosserieentwicklung basiert infolgedessen oftmals auf Erfahrungen der Entwickler oder auf einzelnen Faktoren, wie beispielsweise die zu erwartenden Investitionskosten einer Technologie. Dementsprechend ist aufgrund der intransparenten Entscheidungsfindung eine optimale Ausschöpfung des Gesamtpotentials nicht gewährleistet. Zur Identifikation des Stands der Forschung werden aktuelle wissenschaftliche Ansätze in diesem Themenbereich nachfolgend näher untersucht.

Tabelle 2.1: Ausschnitt relevanter Füge-technologien im Karosseriebau

Fügen durch Umformen	Stanznieten Fließlochformendes Schrauben Clinchen
Fügen durch Schweißen	Laserstrahlschweißen Al (Klassisch/Remote) Laserstrahlschweißen St (Klassisch/Remote) Laserstrahllöten St Widerstandspunktschweißen Al Widerstandspunktschweißen St MIG-Löten Al MIG-Schweißen Al MIG-Löten St MAG-Schweißen St Buckelschweißen
Kleben	Strukturkleben Stützkleben Falzkleben

2.3 Ansätze zur Bewertung von Füge Technologien

Die primäre Aufgabe der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Bewertungsmethodik ist die Auswahl der bestmöglichen Füge Technologie hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und technologischer Kriterien. Die Problemstellung ist aufgrund dieser Charakteristik dem Multiple Criteria Decision Making (MCDM), einem Teilgebiet der Entscheidungslehre aus dem Operations Research, zuzuordnen (Neumann & Morlock, 2002). Dabei handelt es sich grundsätzlich um Entscheidungsprobleme unter Sicherheit; durch eine Erweiterung mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation ist jedoch auch eine Berücksichtigung statistischer Unsicherheiten möglich (Krebs, 2012). Des Weiteren wird bei MCDM-Problemen zwischen den Klassen Multiple Attribute Decision Making (MADM) und Multiple Objective Decision Making (MODM) differenziert. Bei den Verfahren des MODM handelt es sich um eine unendliche Menge an Alternativen mit einer eindeutig quantifizierbaren Zielfunktion. Die Alternativen werden dabei durch verschiedene Nebenbedingungen beschränkt. Bekannte Verfahren des MODM sind die Vektor- oder Zielprogrammierung (Tzeng & Huang, 2012). Ziel dieser Verfahren ist die Ermittlung einer optimalen Lösung unter Berücksichtigung von mehreren Zielfunktionen (Tzeng & Huang, 2012). MADM-Verfahren hingegen werden bei einer endlichen Anzahl an Handlungsalternativen eingesetzt, die auch mit einer qualitativen Zielfunktion beschreibbar sind, um zwischen den Alternativen eine bestmögliche Auswahl zu treffen. Für die weitere Konzeptionierung der Methodik werden die bereits existierenden Verfahren aus dem Bereich des MADM und MODM hinsichtlich Adaptionspotential genauer analysiert.

In der Literatur werden Ansätze zur Bewertung und Auswahl von Füge Technologien in vielfältiger Form diskutiert. Diese reichen von eindimensionalen Verfahren, welche sich ausschließlich auf eine ökonomisch, ökologisch oder technologisch orientierte Bewertung fokussieren, bis hin zu multidimensionalen Verfahren, die eine ganzheitliche Bewertung von Füge Technologien ermöglichen. Die Bewertungsdimension stellt sich daher als bedeutendste Differenzierungscharakteristik heraus, weshalb diese als Ansatzpunkt für die Untersuchung und kritische Würdigung bestehender Ansätze zur Bewertung von Füge Technologien dienen. Hierzu erfolgt im folgenden Abschnitt eine Analyse der einzelnen dimensionsorientierten Verfahren sowie im Anschluss eine spezifischere Untersuchung bestehender multidimensionaler Bewertungsansätze.

2.3.1 Ökonomieorientierte Bewertungsansätze

Im Allgemeinen wird der Erfolg eines Unternehmens durch seine wirtschaftliche Leistung, ausgedrückt in Gewinn oder Rentabilität, gemessen; dementsprechend ist die wirtschaftliche Ausrichtung der einzelnen Kostenverursacher eines Unternehmens essentiell (Heitsch, 2000). Einer der größten Kostenverursacher eines Automobilherstellers ist die Fertigung mit dem Karosseriebau. Zur Berücksichtigung von monetären Aspekten in der Karos-

serieentwicklung ist folglich eine ökonomieorientierte Bewertung von Fügetechnologien unumgänglich. Hierzu wurden bestehende Forschungsansätze zur ökonomischen Bewertung von Fügetechnologien gezielt hinsichtlich der Anforderungen für den Karosseriebau untersucht.

Im Rahmen des Kostenmanagements wird als Bewertungsmethode für langfristige Investitionsprojekte, wie in dem Fall der Aufbau eines Produktionssystems, das Life Cycle Costing (LCC) verwendet (Götze, 2010). Ziel des Ansatzes ist nicht nur die Betrachtung der Anschaffung, sondern eine ganzheitliche Bewertung durch die weitere Berücksichtigung der sogenannten Hidden Costs, die durch den Einsatz einer Produktionsanlage, d.h. von der Anschaffung bis zur Entsorgung, anfallen (VDMA 34160, 2006). Das Eisbergmodell in Abbildung 2.5 veranschaulicht die Hidden Costs, die sich unterhalb der Wasseroberfläche im nicht sichtbaren Bereich befinden. So können die anfänglichen Kostenvorteile einer Investitionsoption sich im weiteren Verlauf der Nutzung durch die vorab nicht sichtbar höheren Betriebskosten umkehren (Geißdörfer, 2009). Die alleinige Berücksichtigung der Anschaffungskosten kann dementsprechend zu unpräzisen Ergebnissen führen. Außerdem ermöglicht die Methodik, mögliche Kostentreiber sowie Kosteneinsparpotenziale zu identifizieren (Schweiger, 2009).

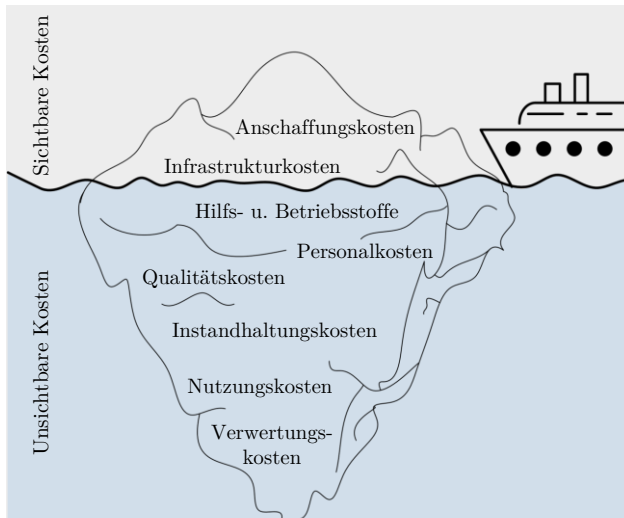


Abbildung 2.5: Eisbergmodell der Lebenszykluskosten

Laut Ellram (1995) ist der LCC-Ansatz ein Bestandteil des Total Cost of Ownership-Ansatzes (TCO). TCO berücksichtigt im Vergleich zu dem LCC-Ansatz die Trans-

aktionskosten (Geissdörfer, Gleich & Wald, 2009). Dazu zählen unter anderem Informationsbeschaffungskosten. Da die Transaktionskosten bei Investitionsprojekten eine vergleichsweise geringe Bedeutung für die Gesamtkosten haben, werden zur Bewertung langfristiger Investitionen, wie in diesem Fall Fügeanlagen, überwiegend LCC-Modelle eingesetzt (Geissdörfer et al., 2009). Daher wird sich im Rahmen dieser Arbeit auf den LCC-Ansatz beschränkt.

Zur Ermittlung der Lebenszykluskosten wurden Standardnormen bzw. Richtlinien entwickelt, die monetäre Einflusskriterien strukturiert und umfassend darstellen. Das ermöglicht eine einfache Übertragbarkeit der Kostenanalyse auf unterschiedliche Anwendungsfälle. Bekannte Vertreter sind u.a. die VDMA 34160 (2006), DIN EN 60300-3-3 (2005) und die VDI-Richtlinie 2884 (2005). Alle untersuchten Standardwerke identifizieren die relevanten Kosten und weisen diese den bestimmten Phasen im Produktlebenszyklus zu. Im Folgenden wird auf die Standardwerke näher eingegangen.

Mit dem Modell der Norm VDMA 34160 (2006) wurde ein Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen entwickelt. Durch eine einheitliche Berechnungshilfe sollen verschiedene Anlagen miteinander vergleichbar gemacht werden. Der strukturierte Aufbau der einzelnen Kostengruppen ermöglicht ein flexibles Erweitern des Modells. Die Berechnung der einzelnen Kostenbestandteile erfolgt mit einer Excel-Kalkulation, die in einem separaten Handbuch definiert wird.

Die DIN EN 60300-3-3 (2005) zur Berechnung der Lebenszykluskosten legt den Fokus auf die Zuverlässigkeit des Produkts, beinhaltet aber auch eine allgemeine Analyse der Kosten, die einen Einfluss auf die Lebenszykluskosten haben. Die Norm liefert je Lebenszyklusphase eine Definition verschiedener Kostengruppen. Der zeitliche Anfall der Kosten wird über die Kapitalwertmethodik⁴ berücksichtigt. In der Norm wird auf Unsicherheiten im Rahmen der Bewertung hingewiesen, die durch den Anwender berücksichtigt und spezifiziert werden müssen.

Die VDI-Richtlinie 2884 (2005) hat das Ziel, die optimale Entscheidung bei der Beschaffung einer Anlage durch methodische Grundlagen zu unterstützen. Das Modell ist somit primär aus der Sicht des Anlagenbetreibers gestaltet. Die Richtlinie basiert auf der LCC-Betrachtung und bezieht zur dynamischen Investitionsrechnung die Kapitalwertmethodik mit ein. Abschließend wird festgehalten, dass Unsicherheiten bei Kaufentscheidungen existieren.

Bornschlegl, Mueller, Bregulla, Mantwill und Franke (2016) greifen die Systematik dieser Richtlinien auf und stellen eine Methode zur Bestimmung aller Lebenszykluskosten von Produktionstechnologien vor. Die Kosten einer Anlage werden bei der Bewertung ins

⁴ Die Kapitalwertmethodik findet Einsatz in der dynamischen Investitionsrechnung zur Ermittlung des Kapitalwerts (net present value). Dabei werden Zahlungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten anfallen, durch Abzinsung auf den Beginn einer Investition vergleichbar gemacht. Weitere Informationen zu der betriebswirtschaftlichen Kennzahl können u.a. der Literatur von Keitel (2007) entnommen werden.

Verhältnis zur jeweiligen Ausbringungsmenge gesetzt. Dadurch wird gleichzeitig auch die Leistungsfähigkeit eines Investitionsprojekts betrachtet.

Des Weiteren existieren Harbour-Fügeäquivalente, die für einen externen Benchmark im Rahmen des jährlichen Harbour Reports für den Automobilsektor von Harbour Consulting, einem Unternehmen das seit 2008 Teil der Oliver Wyman Group ist, entwickelt worden sind (Business Wire, 2008). Die statischen Äquivalente berücksichtigen neben den Investitionskosten die mögliche Ausbringungsmenge, die innerhalb einer definierten Referenzzeit gefügt werden kann. Eine realitätsnahe ökonomische Bewertung ist somit nicht gegeben, da weitere Einflussfaktoren wie z. B. Betriebskosten unberücksichtigt bleiben.

2.3.2 Ökologieorientierte Bewertungsansätze

Während mit der ökonomieorientierten Bewertung die monetären Faktoren untersucht werden, soll mit der ökologieorientierten Bewertung ein wesentlicher Bestandteil der nicht-monetären Faktoren berücksichtigt werden, um die Nachhaltigkeit der einzelnen Füge Technologien zu ermitteln. Die Motivation, eine ökologische Untersuchung von Fertigungsprozessen durchzuführen, beruht dabei auf mehreren Aspekten: Zum einen weist der industrielle Sektor als Hauptverbraucher von Rohstoffen den höchsten Anteil am Gesamtenergieverbrauch in Deutschland auf (Bayer, 2009). Dementsprechend hoch ist das Energieeinsparpotential (Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, 2008). Dieses wiederum hat auch der Gesetzgeber erkannt. Richtlinien und strengere Auflagen sollen national sowie international eine positive Entwicklung der industriellen Ressourceneffizienz fördern (Europäische Union, 2012; United Nations, 2015). Zum anderen gewinnt die ressourceneffiziente Fertigung eine zunehmend wichtigere Rolle für die öffentliche Wahrnehmung und, durch die stetig steigenden Ressourcenpreise, auch für den Erfolg eines Unternehmens (Neugebauer, 2013).

Durch diese Entwicklung versuchen Unternehmen, ökologische Aspekte bereits in der Konstruktionsphase ihrer Produkte zu berücksichtigen. Für die Nutzungs- und Verwertungsphase ist dies bereits heute möglich. Jedoch wird aufgrund von mangelnder Datenverfügbarkeit sowie des daraus resultierenden hohen Bewertungsaufwands die Herstellungsphase oftmals vernachlässigt (Reinhardt, 2014). Daher ist ein geeignetes Bewertungsverfahren erforderlich, dass dem Karosseriebau ermöglicht, den Ressourceneinsatz von Füge Technologien transparent aufzuzeigen. Um eine ganzheitliche ökologische Bewertung zu ermöglichen, werden daher bestehende Forschungsansätze gezielt hinsichtlich der Anforderungen für den Karosseriebau untersucht.

Ökologische Bewertungsverfahren orientieren sich grundsätzlich an der DIN EN ISO 14040 (2009) und DIN EN ISO 14044 (2018). Die darin festgelegten Standardvorgehen können u.a. bei der Identifikation von Umweltproblemen einzelner Produkte, aber auch beim Vergleich von Prozessen herangezogen werden. Eine Ökobilanz wird mittlerweile

zur politischen, aber insbesondere auch zur unternehmerischen Entscheidungsunterstützung eingesetzt (Finnveden et al., 2009). Nach der DIN EN ISO 14040 (2009, S. 8) besteht eine Ökobilanzierung aus der „Zusammenstellung und Beurteilung von Input- und Outputflüssen und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf des Lebensweges“. Ökobilanzen beinhalten häufig die Lebenswegbetrachtungen eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis hin zur Verwertung (cradle to grave). Sowohl für die Öffentlichkeit als auch für den internen Gebrauch werden ökologische Gesamtfahrzeugbilanzen von den Automobilherstellern nach der DIN Norm erstellt, um detaillierte Auskünfte über die vielfältigen Umweltauswirkungen des jeweiligen Fahrzeugs zu erfahren. Neben diesen umfangreichen Bilanzen ist die Methode auch für die Bewertung einzelner Prozesse innerhalb der Produktion geeignet. Diese werden als Teilökobilanzen bezeichnet und vor allem intern eingesetzt, um Produktentscheidungen unter ökologischen Aspekten zu treffen (Braess & Seiffert, 2013). Grundsätzlich lässt sich der festgeschriebene und iterative Ablauf einer Ökobilanz in vier Phasen, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, untergliedern. Die Phasen bestehen aus der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, der Sachbilanzierung, der Wirkungsabschätzung sowie der Auswertung.⁵

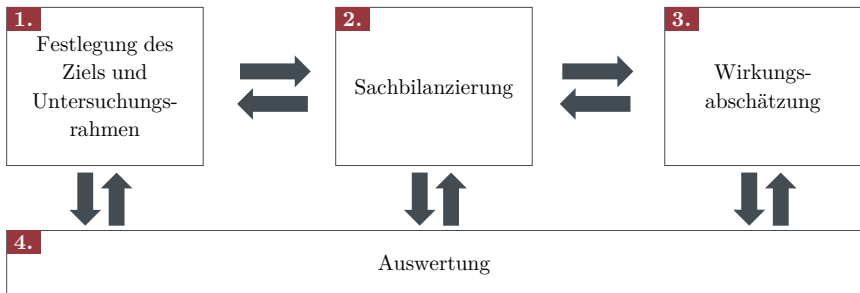


Abbildung 2.6: Phasen einer Ökobilanz in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 (2009)

Nachdem das standardisierte Vorgehen für eine Ökobilanzierung kurz aufgezeigt wurde, werden im Folgenden bestehende ökologische Forschungsansätze für Füge Technologien gezielt hinsichtlich der Anforderungen für den Karosseriebau untersucht. Die Ansätze sind jedoch ausschließlich auf nicht-monetäre Verfahren begrenzt, da die monetären Aspekte bereits in die ökonomische Bewertung eingeflossen sind.

Durch die weitreichende Bedeutung der elektrischen Energie hat sich die Kennzahl des kumulierten Energieaufwands (KEA) etabliert. Der in der VDI-Richtlinie 4600 (2012) festgeschriebene Ansatz liefert schnell und unkompliziert Ergebnisse, weshalb

⁵ Für eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Phasen sei an dieser Stelle auf die DIN EN ISO 14040 (2009) verwiesen.

der Ansatz auch als „kleine Ökobilanz“ bezeichnet wird (Klöpffer & Grahl, 2012). Jedoch liefert der KEA nur einen wichtigen Kennwert für eine ökologische Bewertung; Auswirkungen auf die Umwelt werden im Rahmen dieser Methode nicht betrachtet. Eine reine Energiebetrachtung ist für die in dieser Arbeit zu untersuchenden ökologischen Auswirkungen daher nicht zielführend.

Eine weitere Methode zur Bewertung ohne eine Wirkungsabschätzung stellt die Methode Materialintensität pro Service-Einheit (MIPS) dar. Bei dieser Methode werden alle Energie- und Materialströme erfasst und aufsummiert, die während des Lebenszyklus eines Produktes verwendet werden. Da Output-Ströme schwierig zu erfassen und zu berechnen sind, wird in der Methode vereinfacht angenommen, dass durch eine Reduktion des Materialinputs auch die Umweltbelastungen verringert werden. Weder der KEA noch die MIPS sind in der DIN EN ISO 14040 (2009) oder in der DIN EN ISO 14044 (2018) enthalten und werden daher als kritische Kennzahlen eingestuft. (Sproesser, 2017)

Der Product Carbon Footprint (PCF) ist „die Bilanz der Treibhausgasemissionen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes in einer definierten Anwendung und bezogen auf eine definierte Nutzeinheit“ (BMU, 2010, S. 18). Es wird die gesamte Wertschöpfungskette von der Herstellung der Rohstoffe bis zur Entsorgung bilanziert. Der PCF (dt. CO_2 -Fußabdruck) gibt an, welche Menge an CO_2 bezogen auf einen Zeitraum verursacht wird. Die Vorgehensweise für die Berechnung des PCF ist in der internationalen Norm DIN EN ISO 14067 (2017) festgelegt. Kritisch werden für diese Methode auch die Qualität und Verfügbarkeit der benötigten Daten gesehen.

Ein weiterer bestehender Ansatz ist die sogenannte „Screening LCA“. Diese folgt weitestgehend den Regeln einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 (2009). Im Vergleich zur umfangreichen Ökobilanz werden jedoch überschlägige Abschätzungen für die Ermittlung der Sachbilanzdaten getroffen. Es wird versucht, nur die relevanten Parameter konkret zu erfassen. Die weniger entscheidenden Parameter können erst einmal vernachlässigt bzw. zielsicher abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der Screening LCA sind dementsprechend mit Vorsicht zu bewerten. (EeBGuide, 2018)

Sproesser (2017) analysiert im Rahmen seiner Forschung die Umweltwirkungen beim Metall-Schutzgasschweißen. Die funktionelle Einheit in dieser Arbeit definiert sich als das stoffschlüssige Verbinden eines definierten Bleches. Ziel der Ökobilanzierung ist es, den Einfluss der Fugenvorbereitung für den Schweißprozess zu untersuchen. Der Vorbereitungsprozess spielt dabei eine wichtige Rolle und wird deshalb mitbilanziert. Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die elektrische Energie für das Schweißen und der Schweißzusatzwerkstoff die größten Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Reinhardt (2014) entwickelt auf Grundlage der Ökobilanzierung eine Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung. Die funktionelle Einheit der Untersuchungen bezieht sich dabei auf die Erstellung eines Produktes. Die Auswahl der

Wirkungskategorien und deren Gewichtung zeigen, dass hauptsächlich wirtschaftliche Interessen bei der Bewertungsmethodik berücksichtigt werden.

Kellens, Dewulf, Overcash, Hauschild und Duflou (2012) zeigen im Rahmen der „CO₂PEI-Initiative“ eine Methode auf, um systematisch Daten für eine Sachbilanzierung und die Durchführung einer Ökobilanzierung zur Verfügung zu stellen. Dafür wurden zwei Vorgehensweisen entwickelt: Ein Screening-Vorgehen und ein detailliertes Vorgehen. Beim Screening werden öffentlich verfügbare Daten (Datenblätter, Literatur, etc.) zur Bestimmung des Energiebedarfs genutzt. Das detaillierte Vorgehen beinhaltet vier Module. Diese bestehen aus einer Zeitstudie, einer elektrischen Leistungs- und Energiestudie, einer Studie zum Verbrauch von Hilfs- und Betriebsstoffen sowie einer Emissionsstudie. Mit Hilfe dieser Module können Daten für die Prozesse genau bestimmt werden und anschließend in einer Datenbank hinterlegt werden.

2.3.3 Technologieorientierte Bewertungsansätze

Im Rahmen einer technologieorientierten Bewertung werden, analog zur ökologieorientierten Bewertung, ausschließlich nicht-monetäre Faktoren berücksichtigt. Diese untersuchen zum einen die technologische Realisierbarkeit und zum anderen die Produktqualität, in dem Fall die Qualität der Fügeverbindung. Ziel der Bewertung ist es, eine vergleichende Antwort darauf geben zu können, inwiefern die technologischen Anforderungen zur Lösung der Aufgabenstellung sowie die dabei bestehenden unternehmensspezifischen Randbedingungen erfüllt werden (Taguchi, Chowdhury & Wu, 2004).

Die technologieorientierte Bewertung ist jedoch mit einem verhältnismäßig hohem Aufwand verbunden, bedingt durch die Natur der zu berücksichtigenden Einflussfaktoren, die sich hinsichtlich ihrer Messbarkeit in quantitative sowie qualitative Faktoren unterscheiden lassen (Buhmann & Schön, 2009). Im Gegensatz zur ökonomie- und ökologieorientierten Bewertung berücksichtigt die technologieorientierte Bewertung zusätzlich qualitative Faktoren. Quantitative Einflussfaktoren lassen sich über eine messbare Größe und als Zahlenwert beschreiben. Aufgrund ihrer metrischen Skalierung lassen diese sich über mathematische Zusammenhänge aggregieren (Rosenkranz & Mißler-Behr, 2005). Dem gegenüber stehen die qualitativen Faktoren, die üblicherweise in einer Ordinalskalierung vorliegen. Da es sich hierbei um linguale Kriterien (Ausprägungen wie z. B. schlecht, gut oder sehr gut) handelt, können die Ausprägungen der Eigenschaften nicht über Zahlenwerte angegeben werden (Breiing & Knosala, 1997). Dementsprechend ist eine Transformation qualitativer Faktoren in eine messbare Größe erforderlich. Die Berücksichtigung von qualitativen Einflussfaktoren weist folglich eine deutlich höhere Bewertungskomplexität auf (Breiing & Knosala, 1997).

Um eine technologische Bewertung von Füge Technologien zu ermöglichen, werden bestehende Forschungsansätze gezielt hinsichtlich der Anforderungen für den Karosseriebau untersucht. Die bestehenden technologieorientierten Bewertungsverfahren können grund-

sätzlich in semi-quantitative und qualitative Ansätze unterteilt werden. Die qualitativen Verfahren beinhalten beispielsweise Checklisten und eine Argumentenbilanz. Mit diesen können im Vergleich zu den semi-quantitativen Methoden keine quantitativen Endwerte generiert werden.

Bei dem Checklistenverfahren werden alle relevanten Faktoren in einer Liste eingetragen. Ist eine Entscheidung notwendig, wird die Liste zur Auswahl der richtigen Alternative herangezogen. Es wird überprüft, ob die Kriterien erfüllt werden oder nicht. Dieses Verfahren verhindert ein Vergessen oder Übersehen von Teilaspekten (Freter, 2008).

Die Argumentenbilanz listet Gründe für und gegen die Auswahl einer Alternative auf. Das heißt, die Vor- und Nachteile beziehungsweise die Stärken und Schwächen werden gegenübergestellt. Die Begründung erlaubt eine transparente Entscheidungsfindung (Breiing & Knosala, 1997).

Zu den semi-quantitativen Verfahren gehören unter anderem die Bedeutungsprofile, die technisch-wirtschaftliche Bewertung, die Nutzwertanalyse und der analytische Hierarchieprozess. Anhand dieser Methoden werden Ergebnisse in Form von Zahlen erfasst. Die Zahlen sind jedoch nicht monetär, weshalb sie den technologieorientierten Methoden zugeordnet werden.

Bei der Analyse durch Bedeutungsprofile werden die einzelnen Profile mehrerer Alternativen aufeinandergelegt und verglichen. Für die Bildung dieser Profile werden alle relevanten Entscheidungsmerkmale aufgelistet. Für jede Alternative wird anschließend anhand einer Punkteskala entschieden, inwieweit sie die Merkmale erfüllen. Durch Markieren dieser Bewertungsstufe und anschließendem Verbinden der Werte einer Alternative, entsteht ein Profil (Breiing & Knosala, 1997).

Die technisch-wirtschaftliche Bewertung nach VDI-Richtlinie 2225 Blatt 3 (1998) dient dazu, Schwachstellen eines technischen Produkts aufzuzeigen und diese zu verbessern. Die Bewertungskriterien leiten sich dabei aus den Anforderungen des Produktes ab und werden in technische und wirtschaftliche unterteilt. Die technischen Kriterien werden je nach Erfüllungsgrad bewertet. In einem Diagramm wird die technische Wertigkeit auf der Abszisse abgetragen und die wirtschaftliche Wertigkeit, bei denen die Kosten betrachtet werden, auf der Ordinate.

Die Nutzwertanalyse ist eine Methode zur Bewertung von Handlungsalternativen (Bechmann, 1978; Zangemeister, 2014). Die Grundlage der Nutzwertanalyse bildet die multiattributive Nutzentheorie. Das Gesamtziel besteht aus mehreren Teilzielen, welche getrennt voneinander bewertet werden. Jedes Teilziel bekommt dabei, je nach Bedeutung für das Gesamtziel, ein Gewicht zugeteilt. Die Bewertung des Teilziels multipliziert mit der Gewichtung ergibt dann das Teilergebnis. Durch Aggregation der Teilergebnisse berechnet sich das Endergebnis. Dieses ist dimensionslos, da es keine Maßeinheit besitzt. Das Ergebnis dient daher allein zur Erstellung einer Präferenzordnung der Alternativen (Kühnapfel, 2014).

Der analytische Hierarchieprozess nach Saaty ist ein mathematischer Prozess zur Entscheidungsfindung (Fink & Ploder, 2006). Basis des analytischen Hierarchieprozesses ist die hierarchische Strukturierung des Entscheidungsproblems in kleine Untereinheiten. Dies soll die Entscheidungssituation vereinfachen. Anschließend kommt es zu einer Gegenüberstellung, einem Vergleich und einer Bewertung aller Kriterien beziehungsweise Alternativen. Dazu werden als erstes die Kriterien paarweise miteinander verglichen. Anschließend erfolgt ein paarweiser Vergleich der Alternativen in Bezug zu jedem Kriterium. Durch ein mathematisches Modell, das auf einer Matrizen-Multiplikation beruht, wird eine Empfehlung für eine Alternative abgeleitet. Vorteil des analytischen Hierarchieprozesses ist die Lösung des Problems der Inkonsistenz durch die mathematisch komplexe Eigenvektormethode.⁶

2.3.4 Multidimensionale Bewertungsansätze

Die Zielsetzung der Forschung erfordert im Rahmen der Bewertung von Füge Technologien die Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer sowie technologischer Aspekte. Bei Entscheidungsprozessen, die gleichzeitig zwei oder mehr Zielgrößen im Rahmen der Entscheidungsfindung berücksichtigen, sind mehr- bzw. multidimensionale Bewertungsverfahren erforderlich. Für Füge Technologien liefern vereinzelte Arbeiten erste Ansätze zur gesamtheitlichen Bewertung von monetären sowie nicht-monetären Faktoren. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

Bei der Kosten-Nutzen-Analyse wird, ähnlich zu Methoden aus der Investitionsrechnung, der Nutzen einer Entscheidung den Kosten gegenübergestellt. Dabei wird der Nutzen ebenso wie die Kosten in Geldeinheiten dargestellt (Westermann, 2012).

Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse bewertet im Vergleich zur Kosten-Nutzen-Analyse die nicht-monetäre Wirksamkeit. Anstelle eines monetären Wertes wird die Wirksamkeit jedoch in Punktwerten angegeben (Breiing & Knosala, 1997).

Beispielsweise stellen Prüß et al. (2010) mit ihrem Ansatz dem Konstrukteur ein Werkzeug zur Auswahl von Füge Technologien während der Entwicklungsphase zur Verfügung. Die Methode analysiert das technische Potenzial von Fügeverfahren. Hierzu sind die Technologien hinsichtlich quantitativen (z. B. Flanschbreite) und qualitativen (z. B. Komplexität) Kriterien charakterisiert. Darüber hinaus können Anforderungen aus der Fügeaufgabe abgeleitet werden. Bei dem Vergleich der Füge Technologie-Charakteristika mit den Fügeproblem-Anforderungen können Lösungen eliminiert werden, welche technologisch nicht realisierbar sind. Der Ansatz umfasst eine ganzheitliche, technologische Bewertung. Ökonomische und ökologische Kriterien, wie beispielsweise die Lebenszykluskosten oder Umwelteinflüsse, werden nur partiell berücksichtigt.

⁶ Inkonsistenz beschreibt eine Menge von widersprüchlichen Aussagen. Wenn $A > B$ und $B > C$, folgt daraus, dass $A > C$. Würde jedoch C besser als A bewertet werden, wäre dies ein Widerspruch (Fink & Ploder, 2006).

Mit der Vorgehensweise von LeBacq, Brechet, Shercliff, Jeggy und Salvo (2002) ist es möglich, die optimale Fügetechnologie unter Berücksichtigung quantitativer sowie qualitativer nicht-monetärer Faktoren auszuwählen. Des Weiteren berücksichtigt die Auswahlmethodik konstruktions- sowie werkstoffspezifische Attribute. Die ökonomische Bewertung ist auch Bestandteil der Forschung, wird jedoch nur oberflächlich behandelt.

Esawi und Ashby (2004) fokussieren sich in ihrer Forschung auf monetäre Kriterien. Basierend auf den Lebenszykluskosten wird ein Ranking ermittelt. Nicht-monetäre Faktoren sind ebenso Bestandteil der Forschungen. Diese sind jedoch beschränkt auf den Auswahlprozess, um nicht realisierbare Technologien zu eliminieren.

Goecke und Krautwald (2012) entwickelten ein Werkzeug, um alternative Prozessketten ganzheitlich in der frühen Entwicklungsphase zu bewerten. Der Fokus liegt dabei auf der Energie- und Ressourceneffizienz von thermischen Fügeverfahren unter wirtschaftlichen Aspekten, beispielsweise die Quantifizierung des Energiekonsums unter Berücksichtigung von vor- und nachgeschalteten Prozessen, die für den Fügeprozess notwendig sind. Die technologische Bewertung beschränkt sich auf die Eigenschaften der Fügeaufgabe.

Chien, McKinstry, Baek, Horvath und Dornfeld (2012) entwickelten einen Ansatz zur ökonomischen sowie ökologischen Bewertung von Fügetechnologien. Der Entscheidungsfindungsalgorithmus unterstützt den Anwender bei der Auswahl der optimalen Fügetechnologie hinsichtlich ökonomischer sowie ökologischer Faktoren. Die technologische Bewertung ist kein Bestandteil der Forschung.

Ahnert, Hübner, Riedel und Neugebauer (2013) entwickelten eine Methode zur Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Fügetechnologien. Der Fokus des Ansatzes liegt auf den energetischen Aspekten und den notwendigen Hilfswerkstoffen. Die Bewertung erfolgt in Abhängigkeit von unterschiedlich definierten Betrachtungsräumen, die partiell vor- und nachgelagerte Schritte umfassen. Die wirtschaftliche Bewertung von Fügetechnologien, welche die Kostenermittlung umfasst, ist auf die Investitionstätigkeiten begrenzt. Die technologische Bewertung umfasst ausschließlich die Verbindungsfestigkeit.

2.3.5 Abgleich bewertungsspezifischer Anforderungen

Mit dem Ziel einer multidimensionalen Bewertung von Fügetechnologien wurden die vorgestellten Forschungsansätze analysiert und mit den bewertungsspezifischen Anforderungen abgeglichen. Dabei sollen folgende Anforderungen berücksichtigt werden:

Kennzahl:

Allgemeine Anforderungen:

Zur optimierten Entscheidungsfindung ist eine Bewertungskennzahl erforderlich, da durch die Verdichtung von Informationen Kennzahlen einen einfachen Vergleich verschiedener Sachverhalte und Zusammenhänge ermöglichen (Westphal, 2001).

Adaptivität:	Die Adaptivität beschreibt, inwieweit die Bewertungsmethodik mit sehr geringen bzw. unzureichenden Produkt- und Prozessinformationen insbesondere in der frühen Projektphase unter gleichen Rahmenbedingungen anwendbar ist.
Erweiterbarkeit:	Die Bewertungsmethode soll einen langfristigen Einsatz ermöglichen. Deshalb muss eine Anpassbarkeit der Parameter möglich sein, um einen nachhaltigen Mehrwert zu gewährleisten.
Ökonomiespezifische Anforderungen:	
LCC-Bewertung:	Um alle anfallenden Kosten für die Nutzung einer Anlage realitätsnah zu berücksichtigen, müssen sämtliche Lebenszykluskosten im Bewertungsmodell berücksichtigt werden.
Dynamische Kostenrechnung:	Bei der Bewertung einer Investition müssen die Kosten zeitabhängig ermittelt werden. Der zeitliche Anfall einer Investition hat einen erheblichen Einfluss auf die tatsächliche Höhe der Kosten.
Quantitative Unsicherheiten:	Ökonomische Einflussfaktoren unterliegen oftmals Unsicherheiten, die bei der Entscheidungsfindung von Bedeutung sein könnten. Daher müssen Unsicherheiten quantifiziert und in das Bewertungsmodell integriert werden.
Ökologiespezifische Anforderungen:	
Wirkungsabschätzung:	Eine rein quantitative Erfassung von Input- und Outputströmen in der Sachbilanz ist für eine Umweltbewertung nicht ausreichend. Mithilfe der Wirkungsabschätzung wird eine Verbindung zu den Umweltauswirkungen hergestellt.
Quantitative Kriterien:	Quantitative Kriterien sind messbare Kriterien. Als Input werden für eine ökologische Bewertung hauptsächlich quantitative und eindeutige Größen verwendet, um dem Anspruch an die Datenqualität gerecht zu werden.
Technologiespezifische Anforderungen:	
Qualitative Kriterien:	Qualitative Kriterien sind im Gegensatz zu quantitativen Kriterien nicht messbar. Diese Kriterien gehören ebenso zu den nicht-monetären Kriterien und finden in der bisherigen Literatur nur geringe Beachtung, sind jedoch für eine ganzheitliche Bewertung essentiell.

Ausschlusskriterien:	Damit es zur Eingrenzung möglicher Lösungsvarianten kommt, werden Ausschlusskriterien definiert. Dadurch kann eine Lösung effizienter gefunden werden. Sie finden erst bei der dynamischen Stufe Beachtung, da diese von den technologischen Bauteilanforderungen abgeleitet werden.
Gewichtung:	Die Kriterien sollen nach ihrer Relevanz gewichtet werden. Somit wird ein realitätsnahes Modell erschaffen, da nicht alle Kriterien in der Praxis die gleiche Wichtigkeit haben. Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese auf einer transparenten Datenbasis beruhen und eine möglichst realitätsnahe und objektive Aussage erhalten. Das Gewichtungssystem muss weiterhin den Anforderungen Zeitaufwand, Übersichtlichkeit und Einfachheit gerecht werden, um eine Akzeptanz beim Entscheidungsträger zu gewährleisten.

Tabelle 2.2 zeigt die Gegenüberstellung der bestehenden Ansätze unter Einordnung der Anforderungen auf. Dabei wird ersichtlich, dass die multidimensionalen Ansätze sich auf die ökonomische sowie teilweise auf die technologische Dimension fokussieren. Ökologische Aspekte finden nur partiell Berücksichtigung. Die bewertungsspezifischen Anforderungen, wie beispielsweise eine LCC-Bewertung oder die Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren, können jedoch in keinem der diskutierten Ansätze zufriedenstellend erfüllt werden.

Die im vorherigen Abschnitt diskutierte DIN EN 60300-3-3 (2005), VDI-Richtlinie 4600 (2012) sowie die VDI-Richtlinie 2884 (2005) zur ökonomischen Bewertung von Fertigungsverfahren stellen die einzelnen monetären Einflusskriterien strukturiert und transparent dar, wodurch eine hohe Praxistauglichkeit und leichte Übertragbarkeit der Modelle erreicht werden kann. Allerdings wird nicht näher erläutert, wie die einzelnen Kostengrößen ermittelt werden können. Unsicherheiten sowie die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Unsicherheitsfaktoren, werden in den Richtlinien nur unzureichend berücksichtigt. Weiterhin ist bei den Modellen die Verfügbarkeit produkt- oder prozessrelevanter Daten für eine Bewertung erforderlich. Dementsprechend wird von keinem Ansatz die Anforderung der Adaptivität voll erfüllt. Auch eine übersichtliche Aggregation aller Bewertungsergebnisse, wie beispielsweise in Form verschiedener Kennzahlen, fehlt in den untersuchten Ansätzen. Somit existiert aktuell keine Methodik, die alle gestellten Anforderungen zur ökonomischen Bewertung von Fügetechnologien vollumfänglich erfüllt.

Bei den ökologieorientierten Verfahren weisen insbesondere die allgemeinen Ansätze bei der Wirkungsabschätzung Defizite auf. Die Wirkungsabschätzungen der Screening LCA sind aufgrund der mangelhaften Datenqualität mit Einschränkungen zu betrachten. Weiterhin wird deutlich, dass bisherige Forschungsansätze häufig sehr spezifisch sind und sich daher nicht auf andere Prozesse erweitern oder übertragen lassen. Für die

Tabelle 2.2: Abgleich der Anforderungen mit den vorhandenen Forschungsansätzen

Anforderung: ● erfüllt ① teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt		Anforderungen	Allgemein	Ökonomie	Ökologie	Technologie		
			Kennzahl Adaptivität Erweiterbarkeit	LCC-Bewertung Dyn. Effekte Unsicherheiten	Wirkungs- abschätzung Quantitativ	Qualitativ Ausschluss Gewichtung		
Bewertungsansätze								
Ökonomie	VDMA 34160		● ① ● ● ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	DIN EN 60300-3-3		○ ○ ● ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	VDI 2884		○ ○ ● ① ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Bornschlegl et al.		● ○ ● ● ① ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Fügeäquivalente		● ○ ● ① ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
Ökologie	KEA, VDI 4600		● ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	MIPS		○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ① ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	PCF, ISO 14067		● ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	① ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Screening LCA		● ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Sprösser		○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Reinhardt		● ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Kellens et al.		○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	● ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
Technologie	Checklisten		○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ● ① ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Argumentenbilanz		○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Bedeutungsprofile		○ ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	VDI 2225		● ○ ● ① ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Nutzwertanalyse		● ① ● ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Analytischer Hierarchieprozess		● ○ ● ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
Multidimensional	Kosten-Nutzen-Analyse		● ○ ● ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Kosten-Wirksamkeits-Analyse		● ○ ● ● ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Prüß et al.		● ○ ● ① ① ○	○ ○ ○	○ ○ ● ① ●	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	LeBacq et al.		● ○ ● ① ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ① ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Esawi und Ashby		● ○ ● ① ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ① ● ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Goecke und Krautwald		○ ○ ● ● ○ ①	○ ○ ○	● ○ ○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Chien et al.		● ○ ● ● ○ ○	○ ○ ○	● ● ① ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○
	Ahnert et al.		● ○ ● ① ○ ○	○ ○ ○	○ ● ① ① ○	○ ○ ○	○ ○ ○	○ ○ ○

Sachbilanzierung werden in den Forschungsansätzen unterschiedliche Vereinfachungen vorgenommen. Es fehlt daher an einer einheitlichen Vorgehensweise zur Sachbilanzierung. Ein Vergleich unterschiedlicher Prozesse wird bei allen Ansätzen über die Auswertung der Ergebnisse betrachtet. Es wird selten eine Kennzahl entwickelt, anhand derer eine Entscheidungsfindung über eine numerische Rangfolge abgeleitet werden kann. Dies ist auch ein Kritikpunkt für eine Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 (2009). Es wird darauf hingewiesen, dass es aktuell keine wissenschaftliche Grundlage gibt, die es erlaubt, Ergebnisse einer Ökobilanz übergreifend zu einer Kennzahl zusammenzufassen. Als Vergleichsbasis werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Krones, Pfefferkorn und Shrivastava (2014) sehen aus Sicht des Kundennutzens die Festigkeit als entscheidendes Kriterium. Zur Erreichung einer gleichen Festigkeit wurden deshalb in einem Versuch die Materialdicken dementsprechend angepasst. Für den Vergleich einer geringen Anzahl an Bewertungsgegenständen kann eine derartige Anpassung akzeptabel sein. Bezogen auf die Praxistauglichkeit und Allgemeingültigkeit sind die Anpassungen jedoch aufwendig und problematisch. Deshalb stellt sich die Herausforderung, eine einfach zu messende Vergleichseinheit zu definieren, anhand derer die Fügetechnologien verglichen werden können. Insgesamt ist festzustellen, dass es bisher noch keine Möglichkeiten oder standardisierten Methoden für die ökologische Bewertung von Fügeprozessen in der Karosserieentwicklung gibt.

Bei den technologieorientierten Ansätzen ist erkennbar, dass die Nutzwertanalyse quantitative und qualitative Kriterien abbilden kann, sowie eine transparente und realitätsnahe Bewertung und Gewichtung ermöglicht. Der analytische Hierarchieprozess erfüllt diese Kriterien auch, ist jedoch in seiner Anwendung komplexer. Eine Erweiterung der Methodik ist nur mit viel Zeitaufwand möglich. Bei Wegfall oder Hinzukommen einer Fügetechnologie müssen alle Alternativen von neuem miteinander bewertet werden. Daher ist der analytische Hierarchieprozess weniger praxistauglich. Die Anforderung einer Ausschlussfunktion kann keiner der vorgestellten Ansätze erfüllen.

2.4 Zwischenfazit: Ist-Situation und abgeleiteter Handlungsbedarf

In dem vorangegangenen Kapitel wurde aufgezeigt, dass im Hinblick auf eine multidimensionale Auswahl bereits eine Vielzahl an Bewertungsansätzen existiert, die eine ökonomische, ökologische oder technologische Bewertung von Fügetechnologien im Karosseriebau ermöglichen. Durch die aus einer Stakeholder-Analyse ermittelten Anforderungen wurde ein Abgleich mit den bestehenden Ansätzen durchgeführt.

Dabei konnte für die ökonomieorientierten Ansätze festgestellt werden, dass insbesondere die Anforderung zur Berücksichtigung von Unsicherheiten sowie deren Abhängigkeiten von keinem der untersuchten Ansätze erfüllt werden konnte. Zum anderem stellt die

fehlende Flexibilität der Ansätze eine Herausforderung hinsichtlich der Anforderung Adaptivität dar, um eine Übertragbarkeit der Methodik auf unterschiedliche Anwendungsfälle zu ermöglichen. Für die ökonomische Bewertung kann somit zusammenfassend abgeleitet werden, dass bisher kein Bewertungsansatz existiert, der alle Anforderungen zufriedenstellend berücksichtigt.

Im Rahmen der ökologieorientierten Ansätze wurde die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 (2009) vorgestellt, welche die ökologischen Auswirkungen eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis hin zur Verwertung bilanziert. Sie kann jedoch auch zur Bewertung und zum Vergleich einzelner Prozesse herangezogen werden. Daher bildet die Ökobilanz mit ihren vier Phasen häufig die Basis für die ökologieorientierten Forschungsansätze. Die allgemeinen Ansätze zur ökologischen Bewertung weisen insbesondere für die dritte Phase, der Wirkungsabschätzung, Defizite auf. Ferner sind die Forschungsansätze nur bedingt auf die Praxis übertragbar bzw. erweiterbar. Für die ökologieorientierte Bewertung existiert somit kein Bewertungsansatz, der alle Anforderungen zufriedenstellend berücksichtigt.

Für die technologieorientierte Bewertung wurde erkannt, dass die Nutzwertanalyse sowie der analytische Hierarchieprozess eine Vielzahl der abgeleiteten Anforderungen erfüllen. Erkennbar ist, dass die Nutzwertanalyse quantitative und qualitative Kriterien abbilden kann, sowie eine transparente und realitätsnahe Bewertung erfüllt. Der analytische Hierarchieprozess erfüllt diese Kriterien auch, ist jedoch in seiner Anwendung deutlich komplexer. Eine Erweiterung der Methodik ist mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Bei Wegfall oder Hinzukommen einer Fügetechnologie müssen alle Alternativen von neuem in Relation zueinander bewertet werden. Daher ist der analytische Hierarchieprozess weniger praxistauglich. Die Nutzwertanalyse kann hingegen die Anforderung einer Ausschlussfunktion nicht erfüllen. Ein Bewertungsansatz, der für die technologieorientierte Bewertung alle Anforderungen zufriedenstellend berücksichtigt, existiert somit nicht.

Durch die Analyse der bestehenden ökonomie-, ökologie- und technologieorientierten Forschungsansätze konnte festgestellt werden, dass keiner der vorgestellten Ansätze eine anforderungsgerechte Bewertung von Fügetechnologien zulässt. Daraus leitet sich der Handlungsbedarf zur Entwicklung einer Auswahlmethodik ab, der eine zufriedenstellende Bewertung der drei Dimensionen ermöglicht und diese im Rahmen einer multidimensionalen Bewertung letztendlich zusammenführt.

Konzeption der Auswahlmethodik

Die in Kapitel 2 vorgestellten methodischen Grundlagen und die kritische Würdigung der bestehenden Bewertungsansätze verdeutlichen mit der im Kapitel 1 aufgezeigten Forschungslücke das Optimierungspotential sowie den Handlungsbedarf bei der Auswahl von Fügetechnologien im Karosseriebau. Die Konzeption und anschließende Entwicklung der multidimensionalen Auswahlmethodik erfordert jedoch zunächst eine Eingrenzung des Forschungsbereichs, um eine zielgerichtete Entwicklung der Methodik zu gewährleisten. Die Eingrenzung wird im folgenden Kapitel behandelt, um die grundlegenden Anforderungen an eine Auswahlmethodik zu definieren. Darauf basierend erfolgt die Konzeptionierung. Diese umfasst neben der Darlegung des grundsätzlichen Aufbaus, die zeitliche Einordnung der Methodik in den Produktentwicklungsprozess sowie die Normierung von Fügetechnologien, um neben punktförmigen auch linienförmige Technologien zu berücksichtigen und somit einen Vergleich zwischen einem Fügepunkt und einer Fügenaht zu ermöglichen.

3.1 Eingrenzung des Forschungsbereichs

Um eine zielgerichtete Entwicklung der Auswahlmethodik sicherzustellen, erfolgt eine Eingrenzung des Forschungsbereichs. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, kann dabei zwischen den relevanten Entscheidungsträgern, den prozessualen Entscheidungsgrenzen sowie dem Entscheidungsgegenstand der Methodik abgegrenzt werden.

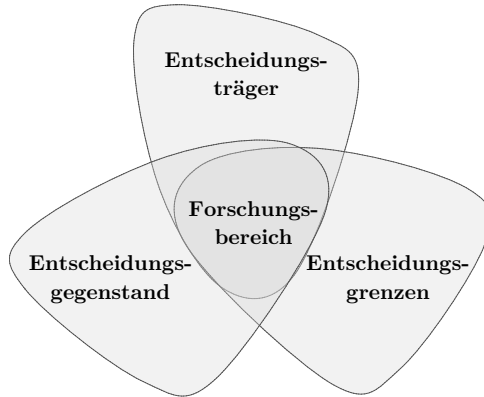


Abbildung 3.1: Eingrenzung des Forschungsbereichs der Methodik

Die Auslegung von Fügetechnologien im Karosseriebau ist unternehmensspezifisch, kann jedoch grundsätzlich dem Bereich der Fahrzeugentwicklung zugeordnet werden. Die Entwicklung wiederum wird durch verschiedene Unternehmensbereiche bei der Auswahl und Auslegung von Fügetechnologien unterstützt. Zum einen existiert eine Technologieentwicklung, die eine Aussage über die technologische Realisierbarkeit der einzelnen Material-Dicken-Kombinationen (MDK) trifft. Zum anderen wird die Entwicklung durch die Produkt- und Prozessplanung unterstützt. Während die Produktplanung die von der Entwicklung definierte Fügetechnik validiert und versucht, diese zu vereinheitlichen, besteht die Verantwortung der Prozessplanung in der Auslegung der Fügesysteme im Karosseriebau. Folglich können für die Eingrenzung des Forschungsbereichs die Fahrzeugentwicklung, Technologieentwicklung sowie die Produkt- und Prozessplanung als primäre *Entscheidungsträger* identifiziert werden. Zu den sekundären Entscheidungsträgern gehören beispielsweise der Einkauf oder die Qualitätssicherung, die den Auswahlprozess indirekt mit beeinflussen. Abbildung 3.2 gibt einen Überblick der Entscheidungsträger im Rahmen der Auswahl von Fügetechnologien.

Die *Entscheidungsgrenzen* definieren den Betrachtungsraum, der im Rahmen der Methodik berücksichtigt wird. Dabei handelt es sich primär um serienreife Fügetechnologien, die einem Entwickler im Rahmen der Entscheidungsfindung im Karosseriebau zur Verfü-

gung stehen. Für eine holistische Auswahl sollen jedoch zusätzlich in Anlehnung an den Leichtbau-Dialog nach Friedrich (2013) Korrelationen der Füge-technik zum Werkstoff und zur Konstruktion berücksichtigt werden, da die Auswahl der Füge-technik oftmals direkte Auswirkungen auf die Roboter-, Vorrichtung- und Verfahrenstechnik hat. Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Füge-technologien zu gewährleisten, ist es daher notwendig, den Betrachtungsraum auszudehnen und direkt korrelierende vor-, nach- sowie parallelgelagerte Produktionstechniken mit zu berücksichtigen.

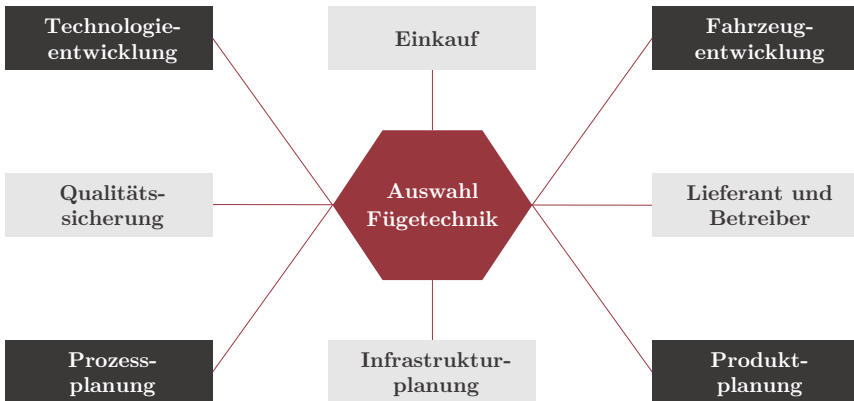


Abbildung 3.2: Primäre (dunkelgrau) sowie sekundäre (hellgrau) Entscheidungsträger im Rahmen der Technologieauswahl in Anlehnung an Bornschlegl (2016)

Eine Auswahl von Füge-technologien ist grundsätzlich immer dann erforderlich, wenn eine Produktentwicklung oder -anpassung vorgenommen wird. Mit dem *Entscheidungsgegenstand* muss daher festgelegt werden, in welcher Phase die Methodik im Entwicklungsprozess eingreifen soll. Um bereits frühzeitig die Entwicklungsprozesse positiv beeinflussen zu können, wird der Entscheidungsgegenstand von Beginn bis zum Ende des Entscheidungsprozesses festgelegt. Der Entscheidungsprozess beinhaltet die Problemformulierung, die Alternativensuche und den -abgleich, die multidimensionale Bewertung sowie letztendlich die Auswahl der Füge-technik durch die Ermittlung der optimalen Handlungsempfehlung. Während mit dem Prozessschritt Problemformulierung der Bedarf einer Füge-stelle beschrieben wird, prüft die Alternativensuche durch einen Abgleich, welche vorhandenen Technologien die Anforderungen der Füge-stelle erfüllen. Mit der anschließenden multidimensionalen Bewertung sollen die realisierbaren Alternativen im Rahmen der definierten Systemgrenzen hinsichtlich der Dimensionen *Ökonomie*, *Ökologie* und *Technologie* untersucht werden. Basierend auf der Bewertung soll eine optimale Handlungsempfehlung unter Berücksichtigung von konstruktions- und werkstoffspezifischen Potentiale aus Sicht des Entscheidungsträgers identifiziert werden.

3.2 Anforderungen an eine multidimensionale Auswahlmethodik

In dem vorangegangenen Abschnitt konnten mit der Eingrenzung des Forschungsbereichs die wesentlichen Entscheidungsträger und -grenzen sowie der Entscheidungsgegenstand ermittelt werden. Darauf basierend ergeben sich für die zu entwickelnde Auswahlmethodik Anforderungen seitens der Entscheidungsträger, die im Rahmen der Methodenkonzeptionierung berücksichtigt werden müssen:

Transparenz:	Für den industriellen Einsatz der Methodik ist die Transparenz hinsichtlich des Bewertungsablaufs sowie der Berechnungsergebnisse sicherzustellen.
Generische Anwendbarkeit:	Bauteile im Karosseriebau besitzen sehr individuelle und bauteilspezifische Anforderungen. Um eine Übertragbarkeit der Methodik zu gewährleisten, ist eine Allgemeingültigkeit der Berechnungsgrundlage gefordert.
Skalierbarkeit:	Die Methodik muss unabhängig vom zu betrachtenden Anwendungsfall erweiterbar sowie modifizierbar sein, um beispielsweise die Dynamik von Kosten oder technologischen Weiterentwicklungen von Fügetechnologien abbilden zu können.
Frühzeitige Anwendung:	Um eine maximale Ausschöpfung des Optimierungspotentials zu gewährleisten, ist eine frühzeitige Bewertung und Handlungsempfehlung der optimalen Fügetechnologie für den jeweiligen Anwendungsfall erforderlich. Da in der frühen Produktentwicklungsphase jedoch eine sehr geringe Datenverfügbarkeit besteht, welche für eine Bewertung erforderlich ist, soll die Methodik durch historische Daten eine statische Bewertung ermöglichen.
Praxistauglichkeit:	Die Auswahlmethodik muss für den industriellen Entscheidungsträger verständlich und handhabbar sein sowie einen akzeptablen Zeitaufwand darstellen.
Effizienz:	Um die Komplexität der zu entwickelnden Methodik zu reduzieren und somit eine effiziente Berechnung zu ermöglichen, ist eine Art Vorfilter (Screening) erforderlich, welcher alle Alternativen eliminiert, die keine technologische Realisierbarkeit für den Anwendungsfall aufweisen.
Multi-dimensionale Bewertung:	Für die Bewertungsmethodik sind die Dimensionen <i>Ökonomie</i> , <i>Ökologie</i> und <i>Technologie</i> isoliert voneinander zu berücksichtigen, da eine Konsolidierung monetärer und nicht-monetärer Faktoren zu einer weiteren Unschärfe der Bewertungsergebnisse führen würde (Breiing & Knosala, 1997).

Ganzheitliche Bewertung:	Die Auswahlmethodik soll auf Baugruppenebene die optimale Füge­technologie oder eine Kombination ermitteln können. Durch die hohe Anzahl an Füge­kombinationen und der resultierenden Komplexität ist eine effiziente Optimierungsfunktion erforderlich, die in einem angemessenen Zeitraum eine ganzheitlich optimale Lösungs­menge ermitteln kann.
Werkstoff-/konstruktions-spezifische Potentiale:	Die Methodik soll in Anlehnung an den Leichtbau-Trialog direkte Korrelationen zwischen Füge­technik und Werkstoff sowie Konstruktion untersuchen, um zusätzliche Potentiale ausschöpfen zu können.

Für die weitere Darlegung des Grundkonzepts werden die genannten Anforderungen an eine multidimensionale Auswahl von Füge­technologien mit den in Kapitel 2.3 abgeleiteten bewertungsspezifischen Anforderungen in die Auswahlmethodik integriert.

3.3 Darlegung des Grundkonzepts

Die abgeleiteten Anforderungen aus dem vorangegangenen Kapitel definieren das Grundkonzept der zu entwickelnden Methodik. Hierzu wird im Folgenden der grundsätzliche Aufbau der Methodik erläutert, um den schematischen Auswahlprozess von Füge­technologien aufzuzeigen. Des Weiteren wird die Einordnung der Methodik in den Produktentwicklungsprozess diskutiert, die aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit in der frühen Phase eine enorme Herausforderung darstellt. Abschließend wird ein Ansatz vorgestellt, welcher durch die Normierung von Füge­technologien einen Vergleich der Methodik zwischen punkt- und linienförmigen Verfahren ermöglicht.

3.3.1 Grundsätzlicher Aufbau der Methodik

Der grundsätzliche Aufbau der multidimensionalen Auswahlmethodik für Füge­technologien im Karosseriebau setzt sich aus vier wesentlichen Komponenten zusammen. Der Aufbau kann Abbildung 3.3 entnommen werden.

Die erste Komponente stellt dabei das Screening-Modell dar, welches die Machbarkeit der einzelnen Alternativen für die jeweiligen Material-Dicken-Kombinationen untersucht. Um eine effizientere Auswahl zu ermöglichen, werden daher die Technologien eliminiert, die keine technologische Realisierbarkeit gewährleisten können. Zu den werkstoffspezifischen Kernprämissen gehören beispielsweise die Materialdicke, der Werkstoff oder die Oberflächeneigenschaften. Die Flanschbreiten oder die Zugänglichkeit eines Fügepunkts stellen dagegen konstruktionsspezifische Kernprämissen dar. Die zweite Komponente führt im Anschluss eine multidimensionale Bewertung durch, die eine

ökonomische, ökologische sowie technologische Untersuchung umfasst. Ergebnis des Bewertungs-Modells ist eine Kennzahl, die den Gesamtwert einer Füge­technologie für die jeweilige Füge­stelle zusammenfasst. Da die Bewertung sich ausschließlich auf eine einzelne Füge­stelle bezieht, wird mit der dritten Komponente ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt. Das Optimierungs-Modell berücksichtigt daher alle Füge­stellen innerhalb einer Baugruppe, um eine optimale Allokation zwischen Technologien und Füge­stellen zu ermöglichen. Das anschließende Potential-Modell soll eine holistische Auswahl von Füge­technologien ermöglichen, in dem werkstoff- und konstruktions­spezifische Potentiale berücksichtigt werden. Daher prüft die letzte Komponente, ob durch konstruktions- oder werkstofforientierte Produk­tanpassungen weitere Potentiale hinsichtlich einer optimalen Auslegung von Füge­technik ausgeschöpft werden können.

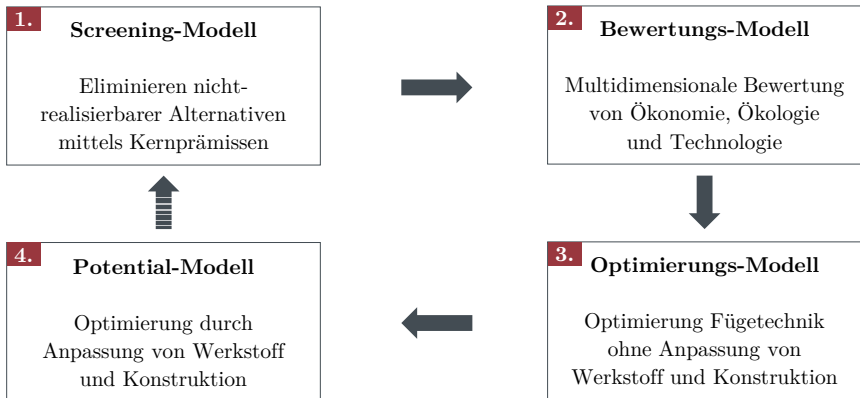


Abbildung 3.3: Grundsätzlicher Aufbau der Auswahlmethodik

Bei dem Auswahlprozess handelt es sich um einen iterativen Ansatz. Dieser beginnt, analog zu den Planungsphasen im automobilen Karosseriebau nach Braess und Seiffert (2013) mit einer Grobplanung, um bereits in der frühen Produktentwicklungsphase Handlungsvorschläge liefern zu können. Jede weitere Iteration bei fortschreitender Zeit ermöglicht noch präzisere und abgesicherte Ergebnisse bis hin zur Detailplanungsphase, in der alle benötigten Informationen verfügbar sind. Die Berechnungsgrundlage hängt somit sehr stark von den verfügbaren Daten ab. Daher widmet sich folgender Abschnitt der Einordnung der Auswahlmethodik in den Produktentstehungsprozess.

3.3.2 Einordnung in den Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess (PEP) ist ein wichtiger Kernprozess eines Unternehmens zur Entwicklung und Umsetzung von Produkten und Innovationen, welcher von Projekt-

start bis Markteinführung alle Phasen der Entwicklung eines Produkts umfasst. Der PEP definiert einen festen Ablauf mit zeitlichen Vorgaben sowie inhaltlichen Zielen. Für die Entwicklung eines Fahrzeugprojekts startet dieser Prozess 56 Monate vor Produktionsbeginn (Bornschlegl, Kreitlein, Bregulla & Franke, 2015). In den frühen Projektphasen, in denen die Projektprämissen festgelegt werden und das Produkt definiert wird, liegen noch keine produkt- oder prozessrelevanten Daten vor. Somit stehen prinzipiell alle verfügbaren Fügetechnologien als Fertigungsverfahren im Karosseriebau zur Auswahl. Die geringe Datenverfügbarkeit sowie die Unsicherheit über die Entwicklung einzelner Einflussfaktoren sind eine Herausforderung für eine multidimensionale Bewertung in dieser frühen Projektphase. Gleichzeitig werden zu diesem Zeitpunkt bereits bis zu 85 Prozent der Gesamtkosten des Projekts determiniert (Bürgel & Zeller, 1997). Die Beeinflussbarkeit der Kosten ist somit zu Beginn des Projekts am größten. Daher hat der zeitliche Aspekt eine besondere Relevanz, um bereits frühzeitig Potentiale und Kostenvorteile bewerten und Auswirkungen auf das Gesamtergebnis bei Änderung einzelner Parameter einschätzen zu können. Mit fortschreitendem Projektverlauf steigen die Kosten für Veränderungen und Anpassungen exponentiell an (Schweiger, 2009). Damit zu jedem Zeitpunkt im PEP eine Bewertung möglich ist, wurde eine Methodik mit adaptiver Gestalt konzipiert. Diese ist durch einen mehrstufigen Aufbau gekennzeichnet, der in Abbildung 3.4 veranschaulicht wird. Mit zunehmender Datenverfügbarkeit sowie abnehmender Unsicherheit steigt die Genauigkeit der Bewertung im Verlauf des Produktentstehungsprozesses.

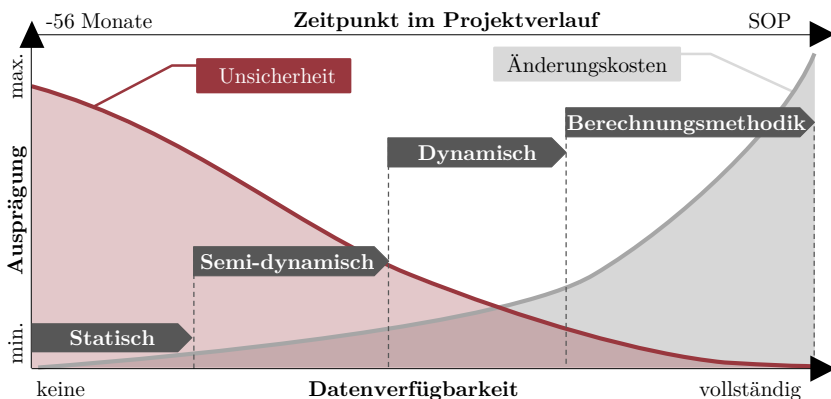


Abbildung 3.4: Bewertungsstufen während des Produktentstehungsprozesses in Anlehnung an Choudry, Kaspar, Alber und Landgrebe (2018)

Die nachfolgend zu entwickelnde Auswahlmethodik besteht aus vier iterativ ablaufenden Detaillierungsstufen. Die erste Bewertungsstufe, die statische Bewertung, erfordert keine produkt- oder prozessrelevanten Daten. Als Berechnungsgrundlage werden gemittelte

Vergangenheitswerte ohne Bauteilbezug herangezogen, wodurch die Genauigkeit der Bewertung an dieser Stelle begrenzt ist.

In der zweiten Stufe, der semi-dynamischen Bewertung, können die erforderlichen Daten bereits in erster Näherung als Intervalle angegeben werden und es erfolgt eine bauteilabhängige Bewertung. Erste Daten sind in der Regel ab der Vereinbarung von Zielvorgaben ca. 48 Monate vor Produktionsbeginn verfügbar (Choudry, Kaspar, Alber & Landgrebe, 2018). Noch nicht verfügbare Daten können durch die idealisierte Datenbasis aus der ersten Bewertungsstufe ergänzt werden. Über den Intervallbereich besteht die Möglichkeit, das günstigste bzw. ungünstigste Szenario in die Bewertung einzubeziehen. Zur Bewertung wird in dieser Stufe der Mittelwert der Ergebnisse aus oberer und unterer Intervallgrenze gebildet.

Etwa 33 Monate vor Produktionsbeginn liegt ein detailliert ausgearbeitetes und bestätigtes Technikkonzept vor (Bornschlegl, 2016). Durch erste Simulationen sind ab diesem Zeitpunkt auch exakte Produkt- und Prozessdaten verfügbar. Damit ist die dritte Bewertungsstufe, die dynamische Bewertung, möglich.

Die letzte Stufe mit der Berechnungsmethodik ist Teil der dynamischen Bewertung. Jedoch werden in der vierten Stufe neben den genauen Planungsdaten ebenfalls Live-Prozessdaten wie beispielsweise freie Anlagenkapazitäten in der Bewertung berücksichtigt. Diese Daten sind jedoch erst zu einem sehr späten Zeitraum (ca. 20 Monate vor Produktionsbeginn) verfügbar, weshalb die Stufe weniger als Steuer-, sondern vielmehr als Kontrollinstrument zu betrachten ist. Der Einsatz der Auswahlmethodik ist daher insbesondere im Zeitraum von 48 bis 33 Monaten vor dem Produktionsbeginn zu empfehlen.

3.3.3 Normierung punkt- und linienförmiger Verfahren

Um eine Vergleichbarkeit zwischen punkt- und linienförmiger Fügeverfahren zu ermöglichen, muss eine Normierung der einzelnen Fügeverbindungen stattfinden. Dies ist erforderlich, um die Nahtlänge eines linienförmigen Verfahrens zu ermitteln, die funktionell einem Fügepunkt entspricht. Da der primäre Nutzen einer Verbindungsherstellung darin besteht, zwei oder mehrere Werkstoffe möglichst fest miteinander zu fügen, erfolgt die Normierung über die Festigkeit der Fügetechnologien (Stephan, 2007).

Im Karosseriebau werden unterschiedliche Prüfverfahren zur Ermittlung der Festigkeit einer Fügeverbindung verwendet. Neben statischen und dynamischen Festigkeiten wird auch die Dauerfestigkeit einer Fügeverbindung ermittelt. Um linien- sowie punktförmige Technologien mit möglichst geringem Aufwand vergleichen zu können, wird in Anlehnung an Stephan (2007) für die Festigkeitsermittlung der statische Scherzugversuch verwendet. Erweiterungen des Untersuchungsrahmens, wie beispielsweise durch den in Riedel (2004) vorgestellten Ansatz einer analytischen Berechnung der mechanisch beanspruchten Ver-

bindungen mittels Nennspannungen, sind jedoch grundsätzlich möglich. In der DIN EN ISO 14273 (2016) sind die grundlegenden Anforderungen für das definierte Prüfverfahren dargelegt. Die maximale Scherzugkraft wird in der Einheit Newton gemessen und weist die Kraft auf, die eine Fügeverbindung maximal standhält, bevor sie bricht. Die Probengeometrien sind für alle Technologien identisch (siehe Abbildung 3.5).

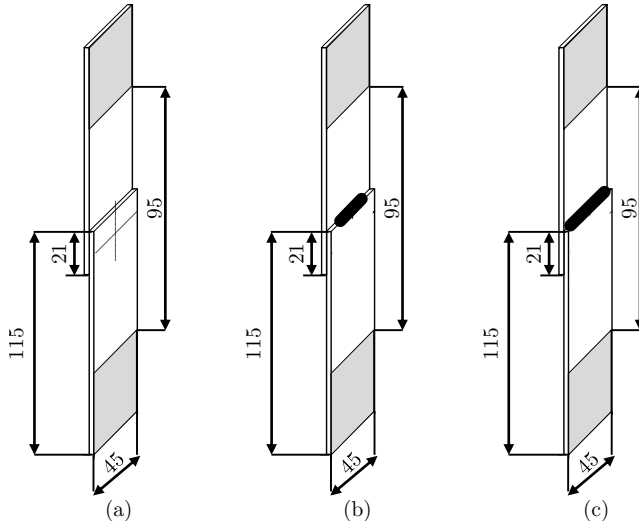


Abbildung 3.5: Einheitliche Probengeometrie zur Ermittlung der Scherzugkräfte;
(a): Punktförmig, (b): 25mm Naht, (c): Durchgangsnaht

Daher wird ein einheitlich definierter Überlappstoß von 21 mm verwendet. Für die punktförmigen Technologien werden 1-Punkt Proben angefertigt (a). Für die linienförmigen Technologien werden sowohl Proben für eine 25 mm Naht (b) sowie eine Durchgangsnaht von 45 mm (c) gefügt. Abbildung 3.6 zeigt exemplarisch die Bestimmung der Referenznahtlänge. Für die Festigkeitsuntersuchungen der linienförmigen Technologien wurden Proben mit der Nahtlänge x_1 (25 mm) und x_2 (45 mm) untersucht. Durch die ermittelten Scherzugkräfte für die zwei Nahtlängen ergeben sich die Punkte S_1 und S_2 . Es wird vereinfacht angenommen, dass sich die Festigkeiten in Abhängigkeit der Nahtlängen linear verhalten. Somit lässt sich die Referenznahtlänge x bestimmen. Anhand der Koordinaten x und y der Punkte S_1 und S_2 kann die Steigung m^{FT} nach

$$m^{FT} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.1)$$

bestimmt werden (Sojka, 2001). Die ermittelte Steigung und ein beliebiger Punkt (hier

S_1) werden anschließend als Standardform in der Gleichung (3.2) formuliert. Durch das Auflösen der Gleichung nach x ergibt sich dann an dem Schnittpunkt der Geraden $f(x_l)$ und $f(x_p)$ die Referenznahtlänge für die jeweilige linienförmige Technologie.

$$f(x_1) = m_{FT} \cdot (x - x_1) + y_1 \quad (3.2)$$

Damit eine realistische Bestimmung der Referenznahtlängen gewährleistet werden kann, findet der Bezug zur maximalen Scherzugkraft einer punktförmigen Technologie ($f(x_p)$) ausschließlich im gleichen Anwendungsfeld (identische MDK) statt.

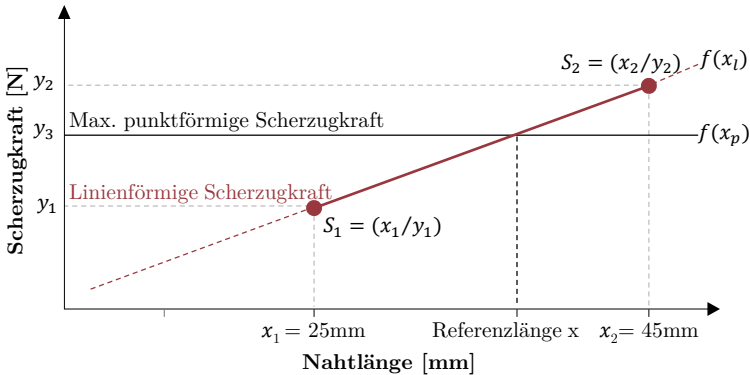


Abbildung 3.6: Ermittlung der Referenznahtlänge über die Scherzugfestigkeit

3.4 Zwischenfazit: Grundkonzept der Auswahlmethodik

In diesem Kapitel erfolgte die grundsätzliche Konzeptionierung der Auswahlmethodik. Für eine zielgerichtete Entwicklung der Methodik wurde zunächst eine Eingrenzung des Forschungsbereichs vorgenommen, die das Definieren von Entscheidungsträgern, Entscheidungsgrenzen sowie des Entscheidungsgegenstands umfasst. Dabei konnten die Bereiche Entwicklung, Technologieentwicklung sowie Produkt- und Prozessplanung als direkte Entscheidungsträger identifiziert werden. Die Entscheidungsgrenzen beinhalten neben den Fügetechnologien im Karosseriebau auch direkt korrelierende vor-, nach- sowie parallelgelagerte Produktionstechniken, um eine Vergleichbarkeit verschiedener Technologien zu ermöglichen. Der Entscheidungsgegenstand, der definiert, in welcher Phase die Auswahlmethodik im Entwicklungsprozess eingreifen soll, wurde von der Anfangs- bis zur Endphase des Auswahlprozesses ausgelegt. Darauf basierend konnten die grundlegenden Anforderungen an eine Auswahlmethodik abgeleitet werden, die im Rahmen der Methodenentwicklung zu berücksichtigen sind.

Im Anschluss erfolgte die Darlegung des Grundkonzepts. Der grundsätzliche Aufbau der multidimensionalen Auswahlmethodik setzt sich dabei aus vier wesentlichen Komponenten zusammen. Während das Screening-Modell eine effizientere Auswahl durch Eliminieren technologisch nicht realisierbarer Alternativen ermöglicht, erfolgt im Bewertungs-Modell eine multidimensionale Bewertung der Fügetechnologien für die spezifische Fügestelle. Um eine ganzheitliche Lösung zu ermitteln, untersucht das Optimierungs-Modell auch die restlichen Fügestellen innerhalb der Baugruppe. Das anschließende Potential-Modell berücksichtigt hingegen noch konstruktions- und werkstoffspezifische Potentiale, um eine holistische Auswahl zu ermöglichen. Damit die Methodik zu jedem Zeitpunkt des Produktentstehungsprozesses eingreifen kann, wurde eine adaptive Bewertungsmethodik mit mehreren Stufen entwickelt. Außerdem wurde ein Ansatz vorgestellt, der durch die Normierung von punkt- und linienförmigen Verfahren über die Festigkeit einen Vergleich zwischen einem Fügepunkt und einer Fügenaht ermöglicht.

Entwicklung einer multidimensionalen Auswahlmethodik

Basierend auf den identifizierten Anforderungen für eine multidimensionale Auswahl von Fügetechnologien wurde im Rahmen des vorherigen Kapitels das Grundkonzept der Auswahlmethodik abgeleitet. Das Grundkonzept besteht aus vier iterativ aufeinander folgenden Komponenten (vgl. Abbildung 4.1). Die erste Komponente eliminiert innerhalb des Screening-Modells all jene Fügetechnologien, die technologisch nicht realisierbar sind. Der Screening-Prozess unterstützt eine effizientere Bewertung im anschließenden Bewertungs-Modell. Das Optimierungs-Modell als dritte Komponente ist erforderlich, um eine ganzheitlich optimale Lösung auf Baugruppenebene zu identifizieren. In der vierten und letzten Komponente wird mit dem Potential-Modell eine holistische Auswahl durch konstruktions- und werkstoffspezifische Anpassungen ermöglicht. Nach der Konzeptionierung der Methodik widmet sich folgendes Kapitel der Entwicklung und Detaillierung der einzelnen Komponenten.

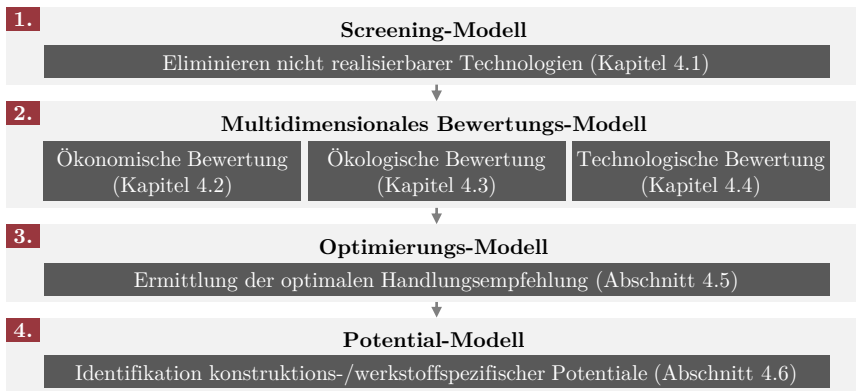


Abbildung 4.1: Grundsätzlicher Aufbau der multidimensionalen Auswahlmethodik

4.1 Untersuchung der technologischen Realisierbarkeit von Füge-technologien

Der Trend hinsichtlich der in Kapitel 2.1 diskutierten Multi-Material-Bauweise von Karosserien hat in den letzten Jahren zu einer hohen Diversität an Füge-technologien geführt. Dabei ist zu beachten, dass nicht jede Fügeaufgabe mit jedem Verfahren realisiert werden kann, da verschiedene Attribute, wie beispielsweise die Anzahl der zu verbindenden Werkstoffe, die Werkstoffdicke oder die Zugänglichkeit der Verbindungsstelle, einen Zusammenschluss verhindern können. Bei diesen Attributen handelt es sich oftmals um Anforderungen an eine Fügeaufgabe, welche nicht veränderbar sind. Diese unterteilen sich in werkstoff- und konstruktionsspezifische Attribute, welche die technologischen Grenzen der verschiedenen Füge-technologien repräsentieren. Falls eine spezielle Anforderung einer Fügeaufgabe die Anwendungsgrenzen einer Füge-technologie überschreitet, ist die Realisierbarkeit einer Technologie nicht gegeben. In Anlehnung an die Methode von Ashby (2011) zur Materialselektion werden in dem Screening-Modell, der ersten Komponente der Auswahlmethodik, Technologien eliminiert, welche die harten Anforderungen an die definierte Fügeaufgabe aufgrund von werkstoff- oder konstruktionsspezifischen Kernprämissen nicht erfüllen. Das Screening-Modell lässt sich in vier Schritte unterteilen (Abbildung 4.2).

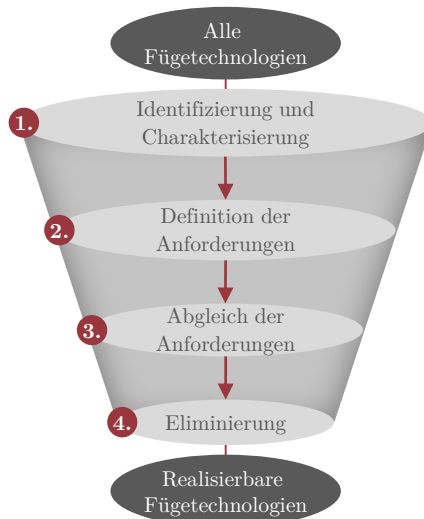


Abbildung 4.2: Ablauf des Screening-Modells

In dem ersten Schritt werden alle Füge Technologien auf Basis der Annahme ermittelt, dass jede Lösung realisierbar ist. Darüber hinaus beinhaltet dieser Schritt die Charakterisierung der Technologien hinsichtlich der werkstoff- und konstruktionspezifischen Kernprämissen. Dabei handelt es sich beispielsweise bei der Materialdicke oder der Oberflächeneigenschaft um werkstoffspezifische Kernprämissen. Konstruktionsorientierte Kernprämissen umfassen Attribute wie beispielsweise die Flanschbreite oder die Zugänglichkeit.

Die Fügeaufgabe wird in dem zweiten Schritt mit der Anforderungsdefinition berücksichtigt. Um die verschiedenen Anforderungen der Fügeaufgabe zu ermitteln, werden die relevanten Merkmale analysiert. Dabei kann es sich beispielsweise um eine einseitige Zugänglichkeit zur Füge Stelle oder um das Verbinden von Aluminium mit Stahl handeln. Bei den Anforderungen kann zwischen weichen und harten Anforderungen unterschieden werden (Ashby, 2011). Während bei weichen Anforderungen durch Bauteilanpassungen eine Realisierbarkeit ermöglicht werden kann, müssen harte Anforderungen ohne jegliche Bauteilanpassung erfüllt werden.

Der dritte Schritt umfasst das Zusammenführen der Informationen der beiden vorherigen Schritte. Dabei werden die definierten Charakteristika einer Füge Technologie mit den Anforderungen der vorliegenden Fügeaufgabe verglichen. Darüber hinaus greift der Abgleich auf eine Datenbank zu, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurde. Diese beinhaltet Laborergebnisse von historischen Untersuchungen für Fügeaufgaben der verschiedenen Füge Technologien. Bei dem Abgleich können zwei unterschiedliche Szenarien eintreten. Zum einen können die Anforderungen der Fügeaufgabe eine Teilmenge der Eigenschaften der Füge Technologie sein. In diesem Fall kann die Füge Technologie die Fügeaufgabe realisieren. Im Fall, dass die Anforderungen der Fügeaufgabe keine Teilmenge der Eigenschaften der Füge Technologie sind, kann die Füge Technologie die Fügeaufgabe nicht realisieren. Dabei wird jede Füge Technologie j ($j = 1, \dots, n$) für jeden Fügepunkt i einer Fügeaufgabe einzeln durchlaufen. Der Abgleich der einzelnen Attribute erfolgt, indem die Datenbankspalten mit der Fügeaufgabe und der Füge Technologie nacheinander abgeglichen werden. Das nachfolgende Beispiel soll den Abgleich verdeutlichen:

Anforderung Fügeaufgabe für Fügepunkt i :

„Werkstoff 1 = Al091“ & „Dicke 1 = 1,4 mm“ & „Werkstoff 2 = Al091“ & „Dicke 2 = 1,8 mm“ & „Zugänglichkeit = beidseitig“

Anforderung Füge Technologie j :

if „Werkstoff 1 = Al091“ & „Dicke 1 + Dicke 2 \geq 3,0 mm“ \vee „Zugänglichkeit = einseitig“

then „Füge Technologie für die Fügeaufgabe nicht realisierbar“

Da in diesem Fall die Gesamtdicke von Werkstoff 1 (1,4 mm) und Werkstoff 2 (1,8 mm) \geq 3,0 mm ist, wird gegen eine Anforderung der Füge Technologie verstoßen. Daher ist die Technologie für die untersuchte Fügeaufgabe nicht realisierbar.

In dem vierten und letzten Schritt werden im Rahmen des Anforderungsabgleichs alle Technologien, die nicht realisierbar sind, eliminiert, um die Auswahl von Fügetechnologien auf die realisierbaren Handlungsalternativen einzugrenzen. Das Ergebnis des Screening-Prozesses ist eine Auflistung möglicher Fügetechnologien für die jeweilige Fügeaufgabe. Diese Auflistung dient als Eingangsgröße der anschließenden multidimensionalen Bewertung der einzelnen Technologien für jede einzelne Fügeaufgabe (vgl. hierzu exemplarisch Tabelle 4.1).

Tabelle 4.1: Beispiel einer Zuordnungstabelle nach dem *Screening-Prozess*

	FP ₁	FP ₂	FP ₃	FP ₄	FP ₅	...
Halbhohlstanzen	X	✓	✓	✓	X	...
Flow-Drill-Screwing	✓	X	✓	✓	✓	...
Clinchen	✓	✓	✓	✓	✓	...
Widerstandspunktschweißen	✓	✓	✓	X	✓	...
Laserstrahlschweißen	✓	X	✓	✓	✓	...
...						

4.2 Ökonomische Bewertung von Fügetechnologien

Die zweite Komponente der Auswahlmethodik bildet die multidimensionale Bewertung. Um eine Aussage über die monetäre Vorteilhaftigkeit von Fügetechnologien treffen zu können, beschäftigt sich folgender Abschnitt mit der ökonomischen Bewertung. Die Berechnungsgrundlage der Bewertungsmethodik basiert dabei auf dem in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Life Cycle Costing Ansatz. Nach der Identifikation der zu untersuchen Kostenarten wird auf deren Ermittlung näher eingegangen. Weiterhin wird zur ganzheitlichen und realitätsnahen ökonomischen Bewertung von Fügetechnologien ein Unsicherheitsmodell integriert, das mögliche Risiken und Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Alternativen berücksichtigt. Abschließend wird eine Bewertungskennzahl eingeführt, welche die Erkenntnisse der Kostenbewertung und Unsicherheiten zusammenführt, um eine transparentere Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Das Vorgehen zur Entwicklung einer ökonomischen Bewertungsmethodik wird in Abbildung 4.3 aufgezeigt.

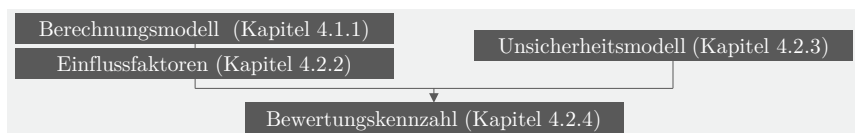


Abbildung 4.3: Vorgehen bei der Entwicklung der ökonomischen Bewertungsmethodik

4.2.1 Entwicklung des Berechnungsmodells

Zur Ermittlung der Gesamtkosten einer Fügetechnologie (j) über die gesamte Projektdauer eines Fahrzeugprojekts wird der Life Cycle Costing Ansatz herangezogen. Dabei wird gemäß den vorgestellten Normen zwischen drei übergeordneten Phasen bzw. Kostengruppen unterschieden: den Anschaffungs- (E), Betriebs- (V) und Verwertungskosten (W). Während die Kosten der ersten und letzten Phase einmalig über die Nutzungsdauer (T) anfallen, entstehen die Betriebskosten fortlaufend mit jedem Jahr der Nutzung (t). Die Laufzeit eines Fahrzeugprojekts liegt aktuell bei sieben bis acht Jahren (Raubold, 2011). Die zeitlich anfallenden Kosten sowie die Zins- (r) und Steuereffekte (S) werden über die Kapitalwertmethodik zur dynamischen Kostenrechnung berücksichtigt, bei der insbesondere Investitionsobjekte mit geringen Anschaffungskosten und hohen Nutzungs- sowie Entsorgungskosten von der Diskontierung profitieren. Die Lebenszykluskosten (LZK_j) in Gleichung 4.1 sind abhängig von der Anzahl an Fügesystemen (A_j).

$$LZK_j = E(A_j) + \sum_{t=1}^T \frac{V(A_j)}{(1+r)^t} + \frac{W(A_j)}{(1+r)^{T+1}} \quad \forall j \in J \quad (4.1)$$

Die benötigte Anzahl an Systemen (A_j) für die jeweilige Fügetechnologie wird maßgeblich durch die Taktzeit der Fertigungslinie (τ_Z) bestimmt. Die Taktzeit gibt die Zeit an, die zur Fertigung eines Fahrzeugs in der Fertigungslinie benötigt wird. Die Taktzeit ist projektspezifisch und abhängig von der technischen Nutzlaufzeit (D^{tech}) der Fertigungslinie pro Jahr und der jährlichen Anzahl der zu fertigenden Fahrzeuge (F). Die Berechnung der Taktzeit einer Fertigungslinie kann der Gleichung (4.2) entnommen werden.

$$\tau_Z = \frac{D^{tech}}{F} \quad (4.2)$$

Weitere Einflussgrößen zur Berechnung der Systemanzahl sind die jeweilige geplante Gesamtanlageneffektivität (OEE_j), die Prozess- (τ_j^f) und Verfahrzeit (τ_j^v) einer Technologie pro Fügepunkt und die Anzahl der Fügepunkte je Bauteil (δ^b). Die Einspannzeiten pro Bauteil werden über den Zeitaufschlagsfaktor (τ^E) berücksichtigt. Freie Kapazitäten bereits bestehender Systeme werden im Modell durch die Variable (η_j^{frei}) berücksichtigt. Je mehr Kapazitäten bereits vom jeweiligen technologiespezifischen Systemtyp im bestehenden Anlagenumfeld verfügbar sind, desto kleiner wird die Anzahl der benötigten Systeme und desto geringer sind die Entstehungskosten der jeweiligen Technologie. Die Berechnung der Neuinvestitionen für die Systeme (A_j) je Fügetechnologie kann der Gleichung (4.3) entnommen werden. In Abhängigkeit der zu produzierenden Fahrzeuge kann es bei Überschreiten einer bestimmten Ausbringungsmenge zu Sprungkosten kommen. In der frühen Entwicklungsphase, in der aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit die statische Bewertung erfolgt, gilt für die Anzahl der Systeme $A_j = 1$.

$$A_j = \left[\frac{\delta^b \cdot (\tau_j^f + \tau_j^v) - \tau_j^v + \tau^E}{\tau^Z \cdot OEE_j} - OEE_j \cdot \sum \eta_j^{frei} \right] \quad \forall j \in J \quad (4.3)$$

Die Betriebskosten (V_j) bestehen aus mehreren Kostenblöcken, die folgendermaßen zusammengefasst werden: Instandhaltungs- (β^{IH}), Energie- (β^E), Hilfsstoff- (β^M) und Prüfkosten (β^Q) sowie Kosten für vorgelagerte Prozesse (β^Z). Dabei kann zwischen fixen (K_β^{fix}) und variablen (K_β^{var}) Betriebskosten unterschieden werden. Variable Kosten ändern sich unmittelbar mit jeder Änderung der Fügepunkanzahl pro Jahr (δ_t). Fixkosten bleiben bis zu einem bestimmten Mengenänderungsgrad unverändert (Götze, 2010). Weiterhin werden Abschreibungs- (ϕ_t) und Steuereffekte (s) für die Berechnung der Betriebskosten in Gleichung (4.4) ergänzt.

$$V_j = (1 - s) \cdot \sum_{\beta} (K_\beta^{fix} \cdot A_j + K_\beta^{var} \cdot \delta_t) - s \cdot \phi_t \quad (4.4)$$

Die Betriebskosten einer Fertigungsanlage sind des Weiteren abhängig von der Ausbringungsmenge. Mit den konkreten Bauteil- und Projektdaten, wie der Anzahl der Fügepunkte pro Bauteil (δ^b) sowie der Anzahl zu produzierender Fahrzeuge (F) pro Jahr, gilt für die jährliche Ausbringungsmenge bzw. für die Anzahl der Fügepunkte pro Jahr:

$$\delta_t = \delta^b \cdot F \quad (4.5)$$

In der frühen Entwicklungsphase liegen jedoch noch keine Daten zur Berechnung der zu setzenden Fügeverbindungen vor. Um dennoch die Anforderung der Adaptivität zu gewährleisten und eine Bewertung zu jedem Zeitpunkt im Entwicklungsprozess zu ermöglichen, wird in dem Fall für δ_t eine idealisierte Anzahl an Fügepunkten pro Jahr angenommen. Diese lässt sich mit der technischen Nutzlaufzeit (D^{tech}), der geplanten Gesamtanlageneffektivität (OEE_j) und der für die Ausbringung einer Einheit benötigten Prozess- (τ_j^f) und Verfahzeit je Technologie (τ_j^v) berechnen. Um die Einspannzeiten der Bauteile bei der Kalkulation der idealisierten Ausbringungsmenge zu berücksichtigen, wird mit (τ^E) ein relativer Zeitaufschlag in die Gleichung (4.6) integriert.¹

$$\delta_t = \frac{D^{tech} \cdot OEE_j}{((\tau_j^f + \tau_j^v) - \tau_j^v) \cdot (1 + \tau^E)} \quad (4.6)$$

Mit dem Ziel, die Kosten und auch die technischen Möglichkeiten für die Verbindung jedes individuellen Bauteils zu optimieren, werden die bestehenden Füge-technologien ständig weiterentwickelt und neue Füge-technologien erforscht. Dennoch muss aus gesamtwirtschaftlicher Sicht berücksichtigt werden, dass eine Vereinheitlichung von Füge-

¹ Für eine pauschale Berücksichtigung der Einspannzeiten kann für den Karosseriebau ein relativer Zeitaufschlagsfaktor zwischen 10 bis 20 Prozent angenommen werden (Choudry, Sandmann & Landgrebe, 2018).

getechnologien durch Ausschöpfung von Skaleneffekten zu Einsparungen bei einzelnen Kostengruppen (K^X) führen kann (Haldi & Whitcomb, 1967). Wenn für verschiedene Bauteile gleiche Strukturen und Anlagentypen verwendet werden können, erhöht das die Flexibilität innerhalb der Produktion. Durch die Nutzung freier Kapazitäten kann somit eine bessere Anlagenauslastung erzielt werden. Des Weiteren führt eine Vereinheitlichung von Fügetechnologien zu einer Optimierung des Ersatzteillagerbestands. Im Rahmen der Kostenbewertung wird mit Gleichung (4.7) zwischen skalierbaren (K^{SK}) und unskalierbaren (K^{UK}) Kosten unterschieden.

$$K^X = [K^{UK} + (A_j - 1) \cdot K^{SK}] \cdot \theta \cdot \varepsilon \quad \theta = \begin{cases} 1, & A_j > 1 \\ 0, & A_j < 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

Bei Anschaffungskosten ergeben sich Skalierungseffekte ab der zweiten Produktionsanlage ($A_j > 1$), da z. B. einige Komponenten nicht erneut angeschafft werden müssen. Erfahrungskurveneffekte (ε) wirken sich ebenfalls auf die Kostengruppen (K^X) aus, da durch zunehmende Erfahrung bei Produktionsprozessen einzelne Prozessschritte optimiert werden, woraus sich Kostensenkungspotentiale ergeben. Der Erfahrungskurveneffekt ist auf Einflussfaktoren wie Lernprozesse, technischen Fortschritt oder Rationalisierung zurückzuführen (Dombrowski, Palluck & Boog, 2008). Bei Verdopplung der kumulierten Produktionsmenge (δ_t) über den Lebenszyklus (T) sinken die Kosten mit einer konstanten spezifischen Rate (α). Bei der Bewertung von Fügetechnologien ist in diesem Zusammenhang der jeweilige Technologielebenszyklus entscheidend (Pohl, 2014). Damit hat eine neue Technologie mit einer bisher geringen produzierten Produktionsmenge (δ_0) größeres Kosteneinsparpotenzial als eine bereits länger eingesetzte Technologie. Gleichzeitig gilt: Je mehr Anlagen des gleichen Typs im Einsatz sind, desto eher wird bei gleicher Gesamtproduktionsmenge die kumulierte Menge der jeweiligen Technologie verdoppelt und desto schneller sinken die Kosten. Kostenkomponenten, die keinen derartigen Einsparpotentialen unterliegen, werden mit $\alpha = 0$ berücksichtigt. Der Erfahrungskurveneffekt wird im Kostenmodell über Gleichung (4.8) integriert (Yelle, 1979).

$$\varepsilon = (1 - \alpha)^{\log_2 \left(\frac{\sum_{t=0}^T \delta_t}{\delta_0} \right)} \quad (4.8)$$

4.2.2 Ermittlung ökonomischer Einflussfaktoren

Mit dem Berechnungsmodell werden die grundsätzlichen Kosten identifiziert, die durch den Einsatz einer Fügetechnologie in einem Fahrzeugprojekt grundsätzlich anfallen. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der Detaillierung der einzelnen Kostenphasen von Fügetechnologien im Karosseriebau. Durch die definierte Ermittlung der einzelnen Kostenfaktoren anhand einer transparenten Berechnungsgrundlage soll eine ganzheitliche ökonomische Bewertung von Fügetechnologien ermöglicht werden. Abbildung 4.4 zeigt

eine Übersicht der im Rahmen dieser Arbeit relevanten und untersuchten ökonomischen Einflussfaktoren.

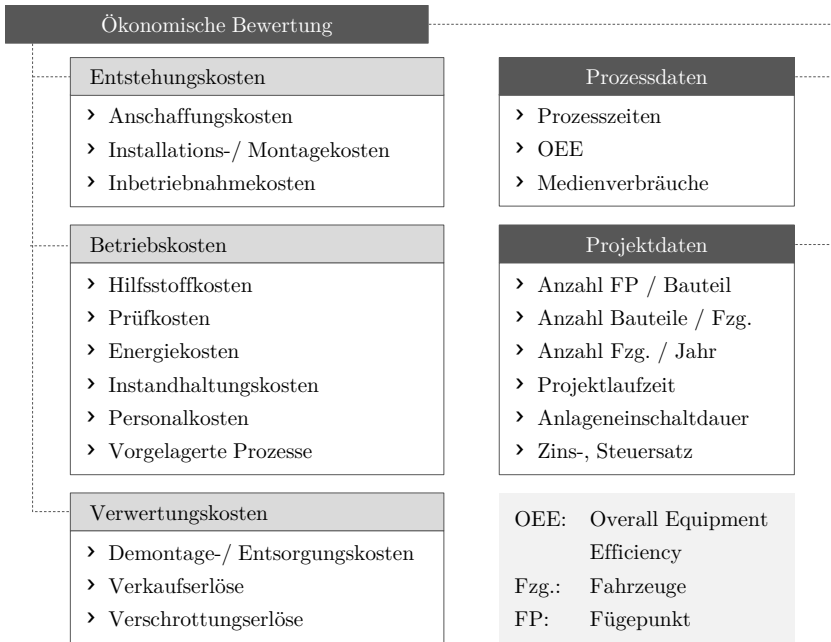


Abbildung 4.4: Einflussfaktoren auf die ökonomische Bewertung von Fügetechnologien

Entstehungskosten: Die betrachteten Entstehungskosten setzen sich je Anlagenkomponente aus Anschaffungs-, Installations-, Montage- und Inbetriebnahmekosten zusammen (VDMA 34160, 2006). Die Anschaffungskosten beinhalten dabei Planungs- und Konstruktionsaufwände sowie Kosten für Beistellumfänge. Üblicherweise wird in der automobilen Serienfertigung als Datenquelle für die Berechnung bzw. Ermittlung der Entstehungskosten eine Datenbank eingesetzt, in der die einzelnen Anlagenbausteine samt Kosten hinterlegt sind. Basierend auf der Datenbank wird für jede Technologie mittels verschiedener Bausteine eine Referenzzelle konfiguriert, die neben den benötigten Mindestumfängen auch Informationen zu dem Flächenbedarf eines Fügesystems enthält. Abbildung 4.5 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt der zu berücksichtigenden Bausteine für die Konfiguration der Referenzzellen.

Der Grundaufbau eines Fügesystems besteht entweder aus einer Roboter- oder einer Laserzelle. Eine Laserzelle ist aufgrund des Bedarfs einer umfassenderen Schutztechnik,

wie z. B. einer lichtdichten Laserkabine, ausschließlich für Laserstrahltechnologien erforderlich. Die Auswahl des Roboters richtet sich nach der für die Prozesstechnologie erforderlichen Traglast. Für die meisten Technologien kann ein einheitlicher Standardroboter eingesetzt werden, der aufgrund großer Abnahmemengen zu günstigen Konditionen beschafft werden kann. Technologien wie beispielsweise das Clinchen oder das FDS erfordern jedoch oftmals eine höhere Traglast. Dadurch können demnach höhere Roboterkosten anfallen. Die zum Fixieren des Bauteils während des Fügeprozesses erforderliche Vorrichtungstechnik ist abhängig von der Bauteilgröße. Zur Vereinheitlichung der vielfältigen Vorrichtungstechniken wurden daher drei exemplarische Bausteine abgeleitet. Eine Variante deckt die Vorrichtungstechnik für Kleinteile (z. B. Außenspiegelverstärkung) ab, eine die mittelgroßen Bauteile (z. B. Federbein) und die dritte Variante deckt die großen Bauteile (z. B. Boden vorne) ab.

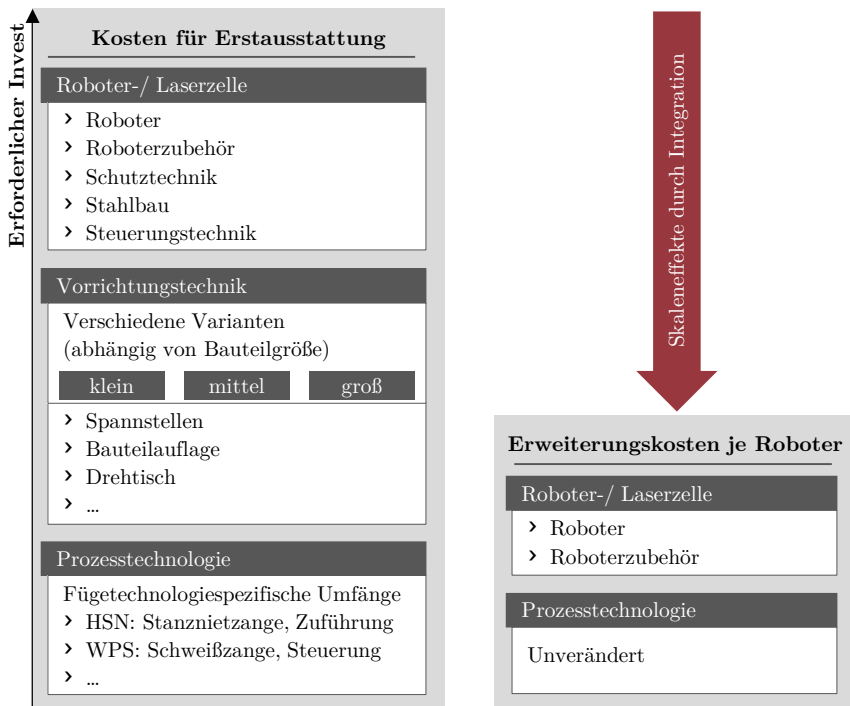


Abbildung 4.5: Beistellumfänge je Integrationsstufe

Die unterschiedlichen Komponenten müssen auch bei der Abschreibung der Investition berücksichtigt werden, da das Steuerrecht unterschiedliche Nutzungsdauern je Anlagentyp

vorschreibt (Bundesministerium der Finanzen, 2001). Weiterhin müssen insbesondere bei Entstehungskosten die zuvor angesprochenen Skaleneffekte berücksichtigt werden. Bei der Planung einer Fertigungsline im Karosseriebau ist bei der Auslegung der Anlagen eine potentielle Integration weiterer Komponenten sicherzustellen. Durch diese Mehrinvestition in die Flexibilität einer Anlage in der ersten Ausbaustufe können während der folgenden Ausbaustufen die Gesamtinvestitionskosten durch Skaleneffekte verringert werden. Die Kosten für die Erweiterung einer Anlage um einen Roboter mit Prozesstechnologie sind im Durchschnitt etwa 60 Prozent geringer, als die Kosten für den Aufbau einer neuen Anlage, da durch die Integration eines zusätzlichen Fügeystems in die bestehende Anlage beispielsweise nicht die gesamte Vorrichtungs- oder Schutztechnik erneut angeschafft werden muss (Choudry, Sandmann & Landgrebe, 2018). Üblich sind in der Anlagenplanung maximal sechs Systeme (κ) für den Karosseriebau. In dem Fall würden die Kosten einer Anlage nach jedem sechsten System sprunghaft ansteigen. Daher wird zwischen unskalierten Kosten für die Erstausrüstung eines Fügeystems in eine Fügeanlage (E^{UK}) und Kosten für die Erweiterung einer Anlage auf 2 bis beispielsweise 6 Fügeysteme (E^{SK}) unterschieden (Choudry, Sandmann & Landgrebe, 2018). Für die Berechnung der Entstehungskosten gilt:

$$E = \left(\left\lfloor \frac{A_j - 1}{\kappa} \right\rfloor + 1 \right) \cdot \phi \cdot E^{UK} + \left[A_j - \left(\left\lfloor \frac{A_j - 1}{\kappa} \right\rfloor + 1 \right) \right] \cdot \phi \cdot E^{SK} \quad (4.9)$$

$$\phi = \begin{cases} 1, & A_j \geq 1 \\ 0, & A_j < 1 \end{cases}$$

Hilfsstoffkosten: Für den Fügeprozess werden bei einigen Fügetechnologien Hilfsstoffe benötigt, die bei der Fertigung in das Bauteil eingehen. Dabei kann es sich um ein Nitelement oder um einen Zusatzdraht handeln. Für die linienförmigen Verfahren werden die entsprechenden Referenznahtlängen (siehe Abschnitt 3.3) gebildet. Die Kosten für Hilfsstoffe (β^M) sind des Weiteren abhängig von der Geometrie und dem verwendeten Werkstoff des Elements bzw. Zusatzdrahts. Insbesondere bei punktförmigen Fügetechnologien, wie beispielsweise dem Stanznieten, stellen Hilfsstoffkosten über den Lebenszyklus eines Fahrzeugprojekts oftmals den größten Kostenfaktor dar.

Prüfkosten: Im Rahmen der Qualitätsprüfung der gefertigten Bauteile fallen Prüfkosten an. Gemäß DIN 55350-11 (2003) handelt es sich um Kosten, die durch planmäßige Prüfungen verursacht werden und die keinen konkreten Fehler zum Anlass haben. Die Prüfungen sind notwendig, um die Erfüllung der Anforderungen an das Produkt sicherzustellen. Die Prüfverfahren und -häufigkeiten je Fügetechnologie werden entsprechend den Anforderungen an die Fügeverbindung seitens Qualitätssicherung festgelegt. Die verschiedenen Prüfverfahren sind in Tabelle 4.2 aufgelistet. Einzelne Prüfungen finden bereits während der Fertigung durch die Prozessüberwachung statt. Die jeweiligen Prüf-

verfahren unterscheiden sich durch die Kosten der erforderlichen Prüfgeräte (G^Q) sowie der benötigten Prüfzeit (τ^Q) und -häufigkeit (f^Q).

Tabelle 4.2: Ausschnitt von Prüfaufwendungen für Füge Technologien im Karosseriebau

Art des Prüfverfahrens	Beschreibung
Anmeißeln	Aufmeißeln der Bleche mittels Prüfmeißel
Ausknöpfungprüfung	Messung des Ausknöpfdurchmessers
Kopfüber/-unterstand	Abstandsmessung zwischen Fügeelement und Blech
Klebstoffnachweis	Merkmale der Verklebung prüfen
Restbodenstärke	Messen der entstandenen Restbodenstärke
Ultraschall	Prüfung eines Schweißpunktes mittels Ultraschallgerät
Schliffbild	Zertrennung der Probe und anschließende Erstellung sowie Analyse eines Schliffbilds
Visuelle Prüfung	Prüfung von Qualitätsmerkmalen, die ohne Prüfgerät möglich sind
Vorhandensein / Lage	Sichtprüfung zur Kontrolle der Lage und Anzahl der Fügeverbindungen

Für die Berechnung der jeweiligen Gerätekosten ($\beta^{Q,G}$) pro Prüfpunkt je Schicht gilt in Abhängigkeit der technischen Nutzlaufzeit (D^{tech}):

$$\beta^{Q,G} = \frac{\sum \tau^{Q,S}}{D^{tech}} \cdot G^Q \quad (4.10)$$

$$\tau^{Q,S} = \tau^Q \cdot f^Q \quad (4.11)$$

Die Prüfzeit pro Schicht ($\tau^{Q,S}$) setzt sich in Gleichung (4.11) aus der benötigten Prüfzeit je Prüfverfahren (τ^Q) und der Prüfhäufigkeit pro Schicht (f^Q) zusammen. Die Berechnung der Prüfhäufigkeit pro Schicht kann gemäß den geltenden Prüfplänen der Tabelle 4.3 entnommen werden. Für die Berechnung sind Informationen zur Anzahl an Schichten pro Tag (S), Arbeitstage pro Monat (d^m) sowie Arbeitstage pro Jahr (d_t) erforderlich. Für die Personalkosten pro Prüfpunkt je Schicht (β^P) gilt mit dem entsprechenden Personalkostensatz ($\beta^{Q,P}$):

$$\beta^P = \sum \tau^{Q,S} \cdot \beta^{Q,P} \quad (4.12)$$

Die gesamten jährlichen Prüfkosten pro Fügepunkt (β^Q) berechnen sich abhängig von der jährlichen Ausbringungsmenge δ_t gemäß folgender Gleichung:

$$\beta^Q = \frac{(\beta^{Q,G} + \beta^{Q,P}) \cdot S \cdot d_t}{\delta_t} \quad (4.13)$$

Tabelle 4.3: Berechnung der Prüfhäufigkeit pro Schicht (f^Q)

Prüfhäufigkeit pro Schicht	f^Q
Jedes Bauteil (100%)	$\frac{\delta_t}{S \cdot d_t}$
Jedes 6. Bauteil	$\frac{\delta_t}{S \cdot 6 \cdot d_t}$
Jedes 10. Bauteil	$\frac{\delta_t}{S \cdot 10 \cdot d_t}$
Ein Bauteil pro Schicht	1
Ein Bauteil pro Tag	$\frac{1}{S}$
Ein Bauteil pro Monat	$\frac{1}{S \cdot d^m}$

Energiekosten: Neben bereits genannten Hilfsstoffen werden auch Betriebsstoffe beim Fügen benötigt. Dazu zählen elektrische Energie, Druckluftenergie, Gase, Schmier- und Kühlmittel (DIN EN 60300-3-3, 2005). Je nach Technologie kann der Strombedarf für den Fügeprozess sehr unterschiedlich sein. Auch die weiteren benötigten Medien wie z. B. Schutzgase oder Druckluftbedarfe sind sehr individuell. Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Medienverbräuche müssen für deren Ermittlung einheitliche Prüfzyklen definiert werden (Haag, 2013). Dabei wird z. B. zwischen Produktionszeiten und Standbyzeiten unterschieden. Mit den ermittelten Energieverbräuchen (E) je Technologie für die verschiedenen Medien (ϱ) wie beispielsweise Strom, Druckluft oder Gas und den einzelnen Energiekostensätzen (β_ϱ^E) ergeben sich die Energiekosten (β_E) zu:

$$\beta^E = \sum_{\varrho}^n \left(\beta_\varrho^E \cdot E_\varrho \right) \quad (4.14)$$

Instandhaltungskosten: Durch die Instandhaltung von technischen Systemen soll der funktionsfähige Zustand erhalten bleiben. Entsprechende Maßnahmen sind nach DIN 31051 (2012) die Inspektion, Wartung, Instandsetzung sowie die Verbesserung des Zustandes. Im Rahmen der Inspektion wird durch Kontrollen der Ist-Zustand festgestellt. Die Wartung dient der Erhaltung des Soll-Zustandes. Zu den erhaltenden Maßnahmen zählen z. B. das Reinigen oder das Schmieren von Komponenten. Durch die Instandsetzung wird der Soll-Zustand wiederhergestellt. Defekte Komponenten werden repariert oder ausgetauscht. Mittels Zustandsverbesserungen sollen technische Schwachstellen beseitigt werden. Weiterhin kann zwischen geplanter und ungeplanter Instandhaltung unterschieden werden (Schenk, 2010).

Die Kosten der geplanten Instandhaltung können beispielsweise aus Wartungsplänen oder Ersatzteillisten ermittelt werden. Die Wartungspläne beinhalten die Anzahl ver-

schiedener Instandhaltungstätigkeiten (ϖ), die geplante Wartungszeit (τ^{IH}) sowie das Wartungsintervall (Ω). Das Intervall gibt an, in welchen Zeitabständen die jeweilige Instandhaltungsmaßnahme durchzuführen ist. Damit Ersatzteile schnell ausgetauscht werden können, liegen diese in einem Ersatzteillager bereit. Somit besteht auch aus strategischer Sicht der Instandhaltung ein Schnittpunkt zu dem zuvor angesprochenen Punkt der Vereinheitlichung von Füge Technologien. Durch einheitliche Füge Technologien ergeben sich auch in der Lagerhaltung mehr Gleichteile, wodurch die Lagerbestände reduziert werden können. Weitere erforderliche Informationen für die Berechnung der geplanten Instandhaltungskosten ($\beta^{IH,1}$) sind seitens des Controllings der Personalkostensatz für einen Instandhalter ($\beta^{IH,P}$), die Ersatzteilkosten (β^ϖ) sowie die technische Nutzlaufzeit D^{tech} . Für die Berechnung der geplanten Instandhaltungskosten gilt:

$$\beta^{IH,1} = \sum_{\varpi}^n \left(\tau_{\varpi}^{IH} \cdot \beta^{IH,P} + \beta^\varpi \right) \cdot \frac{D^{tech}}{\Omega_{\varpi}} \quad (4.15)$$

Ungeplante Instandhaltungsaufwände können nicht genau bestimmt werden. Jedoch können diese durch stochastische Zusammenhänge mit einem angemessenem Aufwand und einer gewissen Unschärfe ermittelt werden. (Uetz, 1986). Dazu werden historische Daten herangezogen. Mit Hilfe der Kennwerte *MTTR* (Mean Time to Repair = durchschnittliche Reparaturzeit), *MCTR* (Mean Cost To Repair = durchschnittliche Ersatzteilkosten) und *MTBF* (Mean Time Between Failure = durchschnittliche Zeit zwischen zwei Fehlern) können die ungeplanten Instandhaltungskosten prognostiziert werden (Bornschlegl et al., 2016). Unter Berücksichtigung der Kennwerte folgt für die Berechnung der ungeplanten Instandhaltungskosten:

$$\beta^{IH,2} = (MTTR \cdot \beta^{IH,P} + MCTR) \cdot \frac{D^{tech}}{MTBF} \quad (4.16)$$

Ungeplante Anlagenausfälle haben einen Einfluss auf die Anlageneffizienz und können so die Rentabilität einer Investition schmälern. Die Instandhaltungskosten (β^{IH}) lassen sich somit aus der Summe der geplanten ($\beta^{IH,1}$) und ungeplanten Instandhaltungskosten ($\beta^{IH,2}$) berechnen:

$$\beta^{IH} = \beta^{IH,1} + \beta^{IH,2} \quad (4.17)$$

Vorgelagerte Prozesse: Einzelne Technologien erfordern Prozessschritte, die dem eigentlichen Fügeprozess vorgelagert sind. Ein Ausschnitt dieser wird in Abbildung 4.6 aufgezeigt. Zur ganzheitlichen Bewertung müssen diese Prozesse technologiespezifisch berücksichtigt werden. Dabei kann zwischen Fremd- und Eigenfertigung unterschieden werden. Im Fall einer Fremdfertigung, bei der die vorgelagerten Prozesse bei einem Zulieferer stattfinden, wird üblicherweise seitens des externen Partners ein Preisaufschlag verlangt. Die Ermittlung von vorgelagerten Prozesskosten im Fall einer Eigenfertigung

(In-house) ist jedoch deutlich komplexer, weshalb sich folgender Abschnitt dieser Thematik widmet.

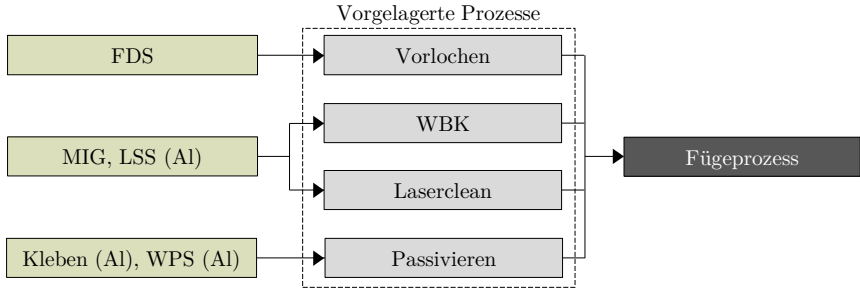


Abbildung 4.6: Vorgelagerte Prozesse einzelner Füge Technologien

Bei dem FDS müssen beispielsweise Bleche in Abhängigkeit vom zu fügenden Material vorgelocht werden. Die Kosten für das Vorlochen sind abhängig vom Zeitpunkt im Produktentstehungsprozess, an dem die Entscheidung getroffen wird. Die Kosten für die Berücksichtigung eines Vorlochs sind in der frühen Phase (vor Beschaffungsfreigabe) marginal und können vernachlässigt werden. Eine nachträgliche Einbringung eines Vorlochs verursacht Änderungskosten an den bereits konstruierten Werkzeugen oder erfordert sogar eine separate Bearbeitung. Dabei können im Vergleich zu den Elementkosten deutlich höhere Bearbeitungskosten anfallen. Die tatsächlichen Kosten sind jedoch stark abhängig vom Zeitpunkt und somit deterministisch nicht bestimmbar.

Ein weiterer vorgelagerter Prozess ist die Werkstoffvorbereitung von Aluminiumbauteilen, um die Qualität der Fügeverbindung zu gewährleisten. Hierzu kann beispielsweise der WBK-Prozess (Waschen-Beizen-Konversionsbeschichten) oder das Laserreinigen eingesetzt werden. Während bei dem WBK-Prozess die Bleche in einem Becken behandelt werden, wird bei dem Laserreinigen die Schmierstoffschicht durch das Verdampfen mittels eines fokussierten Laserstrahls entfernt. Das Laserreinigen bietet im Vergleich deutliche Kosteneinsparungspotentiale, umfasst jedoch keine Passivierung und ist in seinem Anwendungsumfang hinsichtlich Bauteilgeometrie begrenzt.² In die Berechnung der vorgelagerten Prozesskosten des WBK- oder Laserreinigen-Verfahrens (L) fließen neben den Entstehungskosten ($K_L^{E,Z}$), der Nutzungsdauer der Anlage (n_L^Z), die jährlichen Betriebskosten ($K_L^{B,Z}$) sowie die Kapazität (C_L^Z) der Anlage ein. Die Kosten pro Fügepunkt für die Verfahren WBK und Laserreinigen (β_L^Z) werden wie folgt berechnet:

$$\beta_L^Z = \left(\frac{K_L^{E,Z}}{n_L^Z} + K_L^{B,Z} \right) \cdot \frac{1}{C_L^Z} \quad (4.18)$$

² Eine Passivierung gewährleistet, dass die Werkstoffoberfläche die definierten Eigenschaften aufweist, die für eine prozesssichere Verarbeitung erforderlich sind.

Jedoch existieren auch Fügetechnologien, die ausschließlich den Passivierungsvorgang für Aluminiumbauteile benötigen, wie beispielsweise das Kleben. Hierzu bietet der reine Passivierungsvorgang eine wesentlich kostengünstigere Alternative im Vergleich zum WBK-Prozess. Die Kosten für das Passivieren sind dabei abhängig vom Gewicht der Platine, aus der das Bauteil gefertigt wird. Die Kosten für die Passivierung einer Platine ergeben sich aus den Passivierungskosten je kg (β_P^m) und dem durchschnittlichen Platinengewicht (m^b). Zur Ermittlung der Kosten pro Fügepunkt (β_P^Z) für das Passivieren gilt mit der durchschnittlichen Anzahl an Fügepunkten pro Bauteil (δ^b):

$$\beta_P^Z = \frac{\beta_P^m \cdot m^b}{\delta^b} \quad (4.19)$$

Verwertungskosten: In der letzten Phase der Lebenszykluskosten wird die Außerbetriebnahme der Anlage bzw. deren Verwertung betrachtet (VDI-Richtlinie 2884, 2005). Nach dem Auslaufen eines Fahrzeugprojekts können die Anlagen entweder weiterverwendet oder veräußert werden. Bei Weiterverwendung einer Anlage werden häufig einzelne Komponenten mit neuen Funktionen nachgerüstet oder bestehende Komponenten für neue Bearbeitungsprozesse umgebaut. Wird aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen eine Veräußerung der Anlage angestrebt, so werden in der Regel die Kosten für den Abbau durch den Käufer übernommen. Durch die Erlöse würde es sich in der Verwertungsphase um einen negativen Wert der Verwertungskosten handeln. Zur Berechnung wird dabei neben dem Neuanschaffungswert einer Anlage (E) der Veräußerungs- (w^1), Verschrottungs- (w^2) und Verkaufsanteil (w^3) sowie der relative Verschrottungs- (β_w^1) und Verkaufswert (β_w^2) berücksichtigt. Durch die Veräußerung müssen des Weiteren die Einnahmen mit dem anzusetzenden Steuersatz (s) besteuert werden. Demgemäß gilt für die Einnahmen in der Verwertungsphase (W_j):

$$W_j = E_j \cdot w_j^1 \cdot (w_j^2 \cdot \beta_{jw}^1 + w_j^3 \cdot \beta_{jw}^2) \cdot (1 - s) \quad (4.20)$$

Zusammenfassung der untersuchten Kosten: Als Größenordnung zeigt Abbildung 4.7 exemplarisch die Zusammensetzung der in diesem Abschnitt untersuchten Lebenszykluskosten pro Fügepunkt für jeweils zwei repräsentative mechanische sowie thermische Fügetechnologien.³ Dabei wird ersichtlich, dass neben den Investitionskosten insbesondere die Kosten für die vorgelagerten Prozesse einen hohen Anteil der Gesamtkosten bei den thermischen Fügeverfahren einnehmen. Bei den mechanischen Fügeverfahren stellen neben den Investitionskosten insbesondere die Hilfsstoffkosten des Fügeelements einen wesentlichen Kostenfaktor dar.

³ Auf konkrete Daten sowie Bezeichnungen wird an dieser Stelle aus Gründen der Geheimhaltung verzichtet.

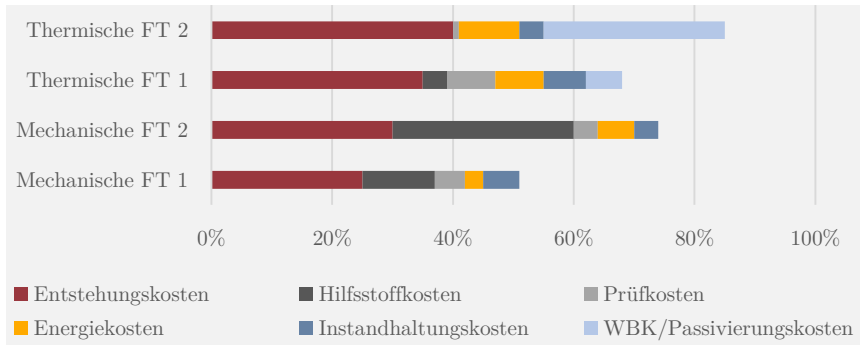


Abbildung 4.7: Ausschnitt der Lebenszykluskosten von Fügetechnologien

4.2.3 Integration eines Unsicherheitsmodells

Die zuvor vorgestellten Kostenfaktoren in dem Berechnungsmodell unterliegen oftmals Unsicherheiten, wie beispielsweise volatilen Energiepreisen oder schwankenden Produktionsmengen. Daher wird ein Unsicherheitsmodell in die Bewertung integriert, welches eine ökonomische Bewertung von Fügetechnologien unter Risiko ermöglicht. Hierzu werden zuerst potentielle Unsicherheiten identifiziert. Durch die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Quantifizierung der Unsicherheiten können die zu erwartenden Kosten für die einzelnen Fügetechnologien ermittelt werden. Die Vorgehensweise zur Entwicklung des Unsicherheitsmodells ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

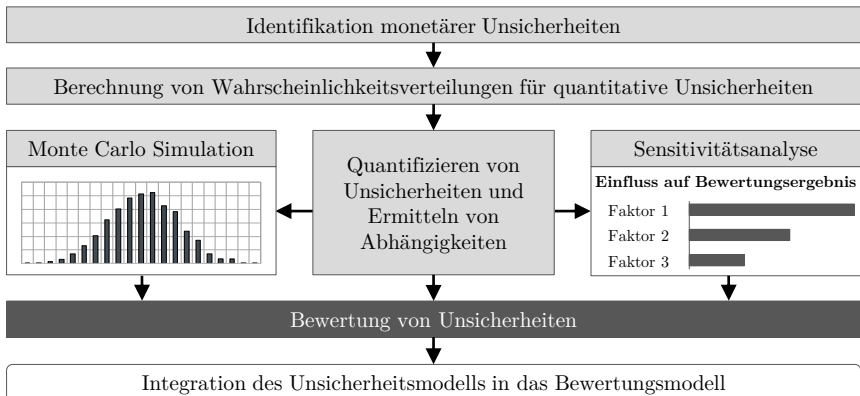


Abbildung 4.8: Vorgehensweise zur Entwicklung des Unsicherheitsmodells in Anlehnung an Krebs (2012)

Bedeutung und Identifikation von Unsicherheiten im Karosseriebau: Investitionen im Karosseriebau sind langfristig ausgelegt. Das Unternehmen bindet sich mindestens über die Dauer eines Fahrzeugprojekts von acht Jahren an eine Anlagentechnik (Raubold, 2011). Daher ist die Berücksichtigung von zukünftigen Entwicklungen der ökonomischen Einflussfaktoren notwendig. Durch die Zukunftsbetrachtung sind nahezu alle Faktoren, die einen Einfluss auf die Lebenszykluskosten einer Produktionsanlage haben, mit Unsicherheiten behaftet (Heitsch, 2000). In Abhängigkeit ihrer Beeinflussbarkeit durch das Unternehmen kann zwischen externen und internen Unsicherheiten differenziert werden (Kinkel, 2009; Krebs, 2012). Während interne Unsicherheiten vom Unternehmen beeinflussbar sind, kann das Unternehmen auf externe Unsicherheiten nur bedingt Einfluss nehmen. Ein Ausschnitt exemplarischer externer und interner Unsicherheiten kann Tabelle 4.4 entnommen werden.

Tabelle 4.4: Unsichere Einflussfaktoren in Abhängigkeit ihrer Beeinflussbarkeit

Externe Unsicherheiten (nicht vom Unternehmen beeinflussbar)
Marktspezifische Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absatz/Nachfrage (Marktentwicklung, Marktanteil) ▪ Materialpreise ▪ Marktzins
Standortspezifische Faktoren
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lohnniveau ▪ Energiepreise ▪ Steuerrecht ▪ Politische Risiken ▪ Wechselkurse
Interne Unsicherheiten (vom Unternehmen beeinflussbar)
Kosteneinsparungspotentiale
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfahrungskurveneffekte ▪ Qualifizierung weiterer Lieferanten
Faktoren zur Leistungserstellung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagenverfügbarkeit (Plan/Ist) ▪ Anlagenauslastung ▪ Prozesszeiten ▪ Produktionsstörungen (ungeplante Instandhaltung) ▪ Mehrkosten beim Aufbau einer neuen Produktionsanlage

Zu marktspezifischen Unsicherheiten zählt unter anderem der zunehmende Wettbewerbsdruck in der Automobilindustrie. Dieser führt zu einer erhöhten Marktdynamik und

damit zu einer schwieriger zu prognostizierenden Entwicklung zukünftiger Absatzzahlen (Bornschlegl et al., 2015; Reinhart, Bredow & Karl, 2009). Verschiedene Trends der Branche hinsichtlich Elektromobilität oder autonomem Fahren verstärken diesen Effekt. Weitere Einflussfaktoren für marktspezifische Unsicherheiten sind beispielsweise neue Kundenbedürfnisse durch ein sich wandelndes Konsumentenverhalten (Parment, 2016). Abhängig vom gewählten Produktionsstandort ergeben sich durch standortspezifische Faktoren weitere externe Unsicherheiten. Dazu zählen z. B. Lohn- und Energiekosten oder abweichende Steuergesetze der einzelnen Länder.

Interne Unsicherheiten sind bis zu einem bestimmten Grad vom Unternehmen beeinflussbar. Die ungeplante Instandhaltung stellt mit den möglichen, unvorhersehbaren Störungen und Ausfällen von Anlagen eine bedeutende Unsicherheit dar. Ausfallraten lassen sich stochastisch ermitteln und können durch verschiedene anlagenspezifische Phasen charakterisiert werden (Matyas, 2016). Durch die Quantifizierung der Unsicherheiten können somit konkrete Prognosen zu dem Ausfallverhalten einer Anlage getroffen werden, sowie Maßnahmen abgeleitet werden, um die Unsicherheiten positiv zu beeinflussen.

In Abbildung 4.9 ist auszugsweise die Entwicklung einzelner unsicherer Einflussfaktoren dargestellt. Neben der Entwicklung des Leitzinses (Deutsche Bundesbank, 2017a), der Einfluss auf den kalkulatorischen Zinssatz bei der Kapitalwertmethodik hat, sind die Entwicklung der durchschnittlichen Tarifverdienste (Deutsche Bundesbank, 2017b) und der Strompreise (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2018) für die Industrie abgebildet. Außerdem wurden die jährlichen Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlich produzierter Stückzahl ausgewertet.

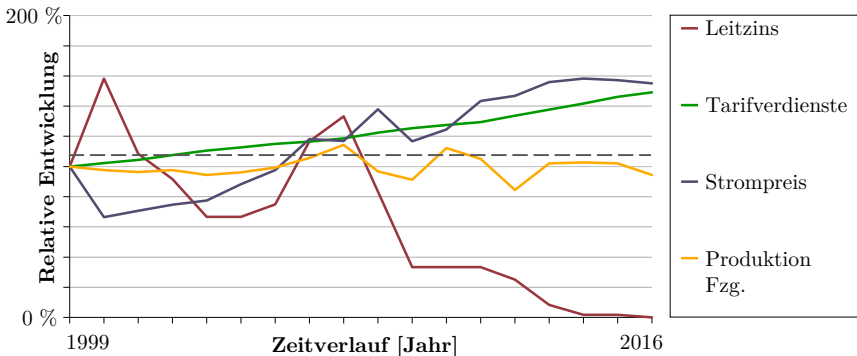


Abbildung 4.9: Historische Entwicklung unsicherer Einflussfaktoren

Neben quantitativen haben auch qualitative Unsicherheiten einen Einfluss auf zukünftige Kostenentwicklungen und somit auf die Vorteilhaftigkeit einzelner Investitionen. Ein Beispiel für eine qualitative Unsicherheit ist die Gefahr von Know-how-Verlust am

Produktionsstandort (Krebs, 2012). Während quantitative Faktoren anhand messbarer Größen bestimmbar sind und als Zahlenwert angegeben werden können, sind qualitative Faktoren nur über bestimmte Eigenschaften beschreibbar und können nicht als Zahlenwert angegeben werden (Krebs, 2012). Zwar können durch verschiedene Verfahren qualitative Faktoren durch Zahlenwerte beschrieben werden, die Aggregation der Faktoren würde allerdings zu einer Unschärfe in der Bewertung führen (Breiing & Knosala, 1997). Daher werden qualitative Unsicherheiten bei der ökonomischen Bewertung im Rahmen einer optimierten Entscheidungsfindung in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Berechnung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für quantitative Unsicherheiten: Da die Entwicklung unsicherer Faktoren grundsätzlich nicht exakt vorherbestimmt werden kann, kommen stochastische Modelle zu deren Ermittlung zum Einsatz (Ude, 2010). Die Bewertung einzelner quantitativer Unsicherheiten erfolgt durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Abhängigkeit von der jeweiligen Klassifizierung. Die Klassifizierung erfolgt über die Merkmale Auftretensart und Zeitabhängigkeit (Krebs, 2012). Die Auftretensart beschreibt, ob eine Unsicherheit in stetiger oder in diskreter Form vorliegt. Die Zeitabhängigkeit gibt an, ob sich die einzelne Unsicherheit über den Bewertungszeitraum wertmäßig verändert. Faktoren wie Rohstoffpreise oder Marktzinsen sind zeitabhängig. Die Beschreibung der Energiekostenentwicklung erfolgt beispielsweise durch eine stetige Normalverteilung, während die abweichenden Anschaffungskosten je Lieferant über eine diskrete Normalverteilung abgebildet werden können.

Um die Entwicklung unsicherer Einflussfaktoren zu prognostizieren, werden vergangenheitsbasierte Daten untersucht. Bei einer Prognose zur Entwicklung unsicherer Faktoren muss die zu Grunde liegende Annahme beachtet werden, dass sich zukünftige Werte ähnlich wie in der Vergangenheit entwickeln. Außergewöhnliche Ereignisse gegen einen langfristigen Trend, wie beispielsweise Wirtschaftskrisen, sind nur schwer abbildbar. Mittels der Regressionsanalyse kann die historische Entwicklung eines Einflussfaktors durch Funktionsgleichungen angenähert werden (Bredow, 2014). Die Präzision dieser Funktionsgleichungen wird durch das Bestimmtheitsmaß angegeben, das von der Standardabweichung (σ) der einzelnen Datenpunkte abhängt (Meintrup & Schäffler, 2005). Die Standardabweichung, auch Volatilität genannt, beschreibt die Schwankung einer Zeitreihe um den Mittelwert und ist ein gängiges Maß wirtschaftlicher Berechnungen (Georgii, 2015). Wie aus Abbildung 4.10 ersichtlich, liefert die standardmäßig berechnete Volatilität (σ) nicht immer ein optimales Ergebnis über die Genauigkeit der Prognose. Im dargestellten Beispiel ist die Volatilität von Faktor 2 größer, obwohl die Abweichung der angenäherten Regressionsgeraden (RG) geringer ist als bei Faktor 1. Dies wird durch den Flächenvergleich der betragsmäßigen Differenzkurven (DK) zwischen tatsächlicher Entwicklung und Regressionsgeraden verdeutlicht. Je geringer die Fläche der Differenzkurve, desto optimaler wird der tatsächliche Verlauf durch den idealisierten Verlauf beschrieben.

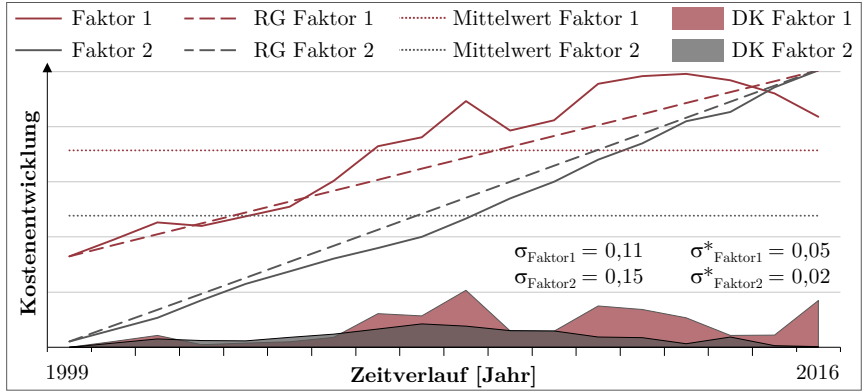


Abbildung 4.10: Aufzeigen der Schwachstelle zur Berechnung der standardmäßigen Volatilität (σ) anhand der Entwicklung der Differenzkurven (DK) und Regressionsgeraden (RG)

Durch die Berechnung der angepassten Standardabweichung (σ^*) vom tatsächlichen (m^σ) zum modellierten Wert (w_Z^σ) im Verhältnis zu der Prognosehäufigkeit (Z^σ) kann wie in Gleichung (4.21) dargestellt eine verbesserte Bewertung der Vorhersagegenauigkeit erzielt werden. Der modellierte Wert ersetzt dabei den üblicherweise für die Volatilitätsberechnung verwendeten Mittelwert und wird durch den jeweiligen Wert der Regressionsgeraden gebildet. Grundsätzlich gilt, je weiter der zu prognostizierende Wert in der Zukunft liegt, desto ungenauer wird die Prognose (Alicke, 2005).

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{\sum_{Z^\sigma}^n (w_Z^\sigma - m^\sigma)^2}{Z^\sigma}} \quad (4.21)$$

Monte Carlo Simulation: Die Bewertung unsicherer Einflussfaktoren kann mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation erfolgen. Die mathematischen Beziehungen zwischen den einzelnen Faktoren können dem zuvor beschriebenen Kostenmodell entnommen werden. Im Rahmen der Simulation werden in jedem Berechnungsschritt Zufallszahlen aus den gegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen unsicheren Variablen generiert. Je größer die Anzahl an Simulationsdurchläufen ist, desto mehr nähert sich die Wahrscheinlichkeitsverteilung dem tatsächlichen Ergebnis an. Die Genauigkeit der Berechnung ist proportional zum Faktor $1/\sqrt{G^S}$, wobei G^S die Anzahl an Durchläufen ist (Shonkwiler, 2013). Eine hundertfache Erhöhung der Simulationsdurchläufe reduziert den Fehler demzufolge um ein Zehntel. Je nach Anforderungen muss ein geeigneter Kompromiss zwischen Berechnungsgeschwindigkeit und -genauigkeit gewählt werden.

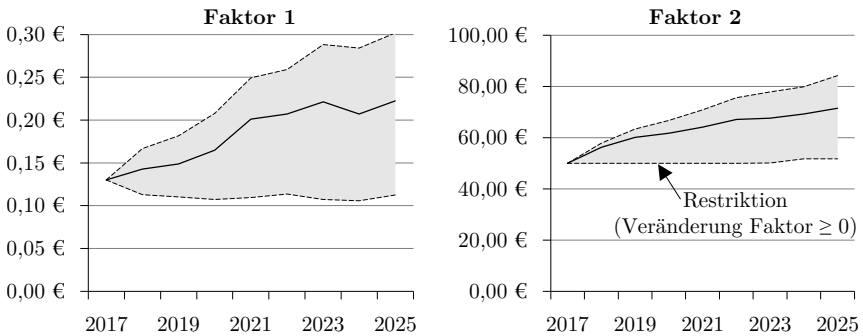


Abbildung 4.11: Simulationsergebnisse einzelner Einflussfaktoren

Abbildung 4.11 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der simulierten Entwicklungen einzelner unsicherer Einflussfaktoren nach einem Simulationsdurchlauf. Die gestrichelten Linien grenzen den Bereich ein, in dem alle Ergebnisse der Simulation liegen. Der wahrscheinlichste Wert ist mit einer durchgehenden Linie gekennzeichnet. Bei der Auslegung des Simulationsmodells können, wie im Fall von Faktor 2, auch Restriktionen festgelegt werden, die mögliche Wertebereiche einschränken. Gemäß Abbildung 4.12 setzt sich das Gesamtergebnis der Simulation aus sicheren und den zuvor beschriebenen unsicheren Faktoren zusammen. Die simulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung liefert gleichzeitig den Erwartungswert. Für den Fall der Kostenberechnung sind Letztere die Kosten, die mit der größten Wahrscheinlichkeit anfallen werden.

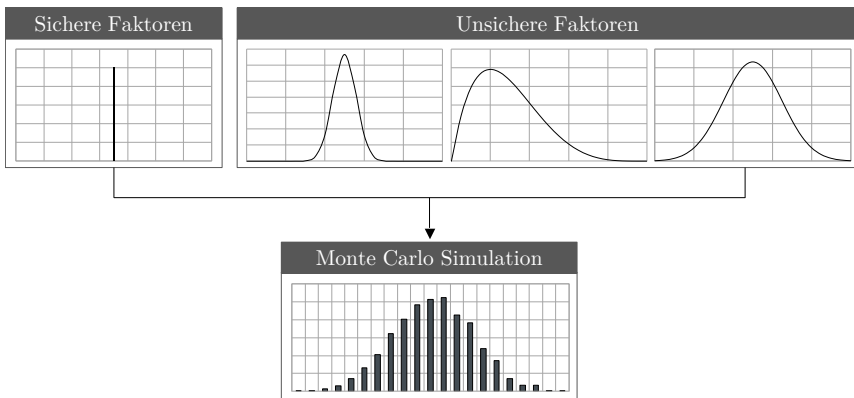


Abbildung 4.12: Schematischer Aufbau des Simulationsmodells in Anlehnung an Choudry, Sandmann und Landgrebe (2018)

Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den Unsicherheiten: Abhängigkeiten zwischen unsicheren Faktoren haben Einfluss auf das Gesamtrisiko. Daher werden sie innerhalb des Kalkulationsmodells durch die Integration von Korrelationen berücksichtigt. Die innerhalb der Monte Carlo Simulation gebildeten Zufallszahlen sind nicht miteinander korreliert und müssen je nach Abhängigkeit in korrelierte Zufallszahlen transformiert werden. Je mehr unsichere Einflussfaktoren in das Modell mit aufgenommen werden, desto mehr Korrelationen müssen dementsprechend gebildet werden. Der Korrelationskoeffizient (K) ist ein Maß dafür, wie sehr Faktoren voneinander abhängen (Meintrup & Schäffler, 2005). Der Korrelationskoeffizient kann Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen. Bei nicht korrelierten Faktoren gilt $K = 0$. Besteht eine vollständige positive Abhängigkeit zwischen den Faktoren, so gilt $K = 1$. Hängen die Faktoren entgegengesetzt voneinander ab, entspricht $K = -1$. Da auch Korrelationen existieren können, obwohl kein kausaler Zusammenhang zwischen zwei Einflussfaktoren besteht, muss darauf geachtet werden, dass die betrachteten Faktoren in einem sachlogischen Zusammenhang stehen (Krebs, 2012). Im Rahmen einer Monte Carlo Simulation können korrelierte Zufallszahlen z. B. durch eine Cholesky-Zerlegung gebildet werden (Lange, 2010). Dabei wird zuerst der Korrelationskoeffizient $K(X, Y)$ der Faktoren X und Y ermittelt. Wenn in der Simulation zuerst die Zufallszahl für Faktor X generiert wird, gilt für die Berechnung der korrelierten Zufallszahl von Y folgendes:

$$Y^{corr} = K(X, Y) \cdot X + \sqrt{1 - K(X, Y)^2} \cdot Y \quad (4.22)$$

Sensitivitätsanalyse: Die Komplexität der Fertigungsprozesse im Karosseriebau stellt eine große Herausforderung bezüglich der Prognostizierbarkeit zukünftig anfallender Kosten dar. Daher müssen an manchen Stellen sinnvolle Vereinfachungen angenommen werden. Um Modellierungskomplexität und -aufwand so gering wie möglich zu halten, wird eine Sensitivitätsanalyse zur Identifikation der größten Einflussfaktoren auf das Endergebnis durchgeführt. Bei einer Sensitivitätsanalyse wird der Wert eines jeden Faktors variiert, während die übrigen Faktoren konstant gehalten werden.

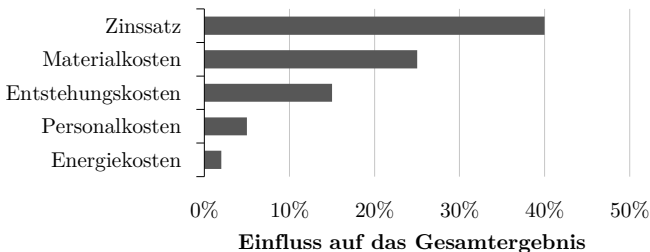


Abbildung 4.13: Beispielhafte Sensitivitätsanalyse einzelner Einflussfaktoren

So können die Auswirkungen des einzelnen Faktors auf das Endergebnis untersucht werden. Je mehr sich der Erwartungswert der Kosten bei Variation des Einflussfaktors ändert, desto größer ist dessen Einfluss. Abbildung 4.13 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse einzelner Einflussfaktoren, die einer Unsicherheit unterliegen.

Bewertung von Unsicherheiten: Nachdem die Monte Carlo Simulation durchgeführt worden ist, erfolgt die Bewertung der Ergebnisse. Wie in Abbildung 4.14 beispielhaft veranschaulicht, liefert die Simulation als abschließendes Ergebnis eine Kostenspanne der Gesamtkosten der jeweiligen Fügetechnologie (FT), bei der jedem Wert eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird. Als Darstellungsform kann die einfache (a) oder die kumulative (b) Wahrscheinlichkeit verwendet werden.

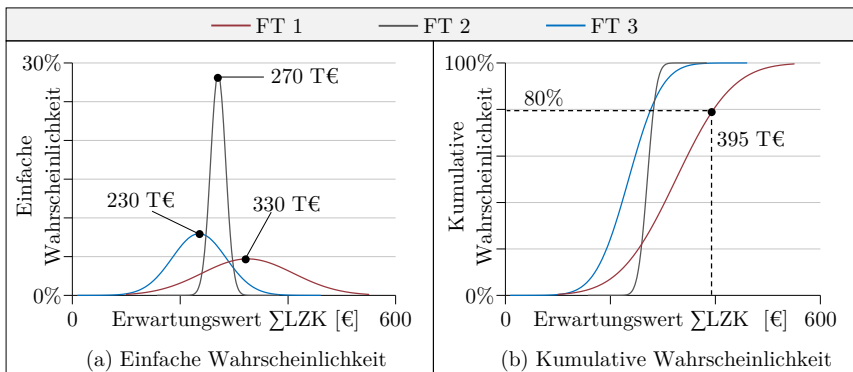


Abbildung 4.14: Gesamtergebnis der Monte Carlo Simulation

Im dargestellten Beispiel weist FT 2 die geringste Standardabweichung beim errechneten Erwartungswert auf. FT 3 hat eine größere Standardabweichung als FT 2, dafür ist der Erwartungswert der Kosten im Vergleich geringer. An Stelle des wahrscheinlichsten Wertes kann je nach Risikostrategie des Unternehmens auch ein Erwartungsbereich gewählt werden. Der Bereich gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Kosten nicht über dem errechneten Wert liegen. Für das gewählte Beispiel liegt dieser Bereich z. B. bei 80 Prozent. Mit 80 prozentiger Wahrscheinlichkeit werden bei der FT 2 die Gesamtkosten den Wert von 395 TE nicht übersteigen. Je risikoaverser die Strategie ausgelegt ist, desto größer wird der Wahrscheinlichkeitsbereich gewählt.

Die Funktion zur Bewertung der Unsicherheit einer Technologie ist in Gleichung (4.23) dargestellt und setzt sich aus zwei wesentlichen Merkmalen zusammen: der angepassten Standardabweichung (σ^*) und dem Unsicherheitsgewichtungsfaktor (g^{ψ}). Bei jeder Bewertung wird die jeweilige Technologie und die Technologie mit der geringsten Stan-

dardabweichung (σ_{min}^*) berücksichtigt. Die bestmögliche Bewertung liegt bei $\psi_j = 1$. Je größer die Standardabweichung, desto breiter die Streuung der möglichen Kosten und desto geringer die Wahrscheinlichkeit, dass der prognostizierte Erwartungswert eintritt. Daher erfolgt bei einer größeren Standardabweichung auch eine stärkere Abwertung durch die Unsicherheitsfunktion. Mit dem Gewichtungsfaktor kann der Einfluss der Standardabweichung auf die Gesamtbewertung angepasst werden.

$$\psi_j = \left(\frac{\sigma_{min}^*}{\sigma_j^*} \right)^{g^\psi} \quad \forall j \in J \quad (4.23)$$

4.2.4 Berechnung der ökonomischen Bewertungskennzahl

Um die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung in eine Kennzahl zusammenzuführen, werden über den Kosten-Nutzen-Index (CB_j) die jeweiligen Kosten einer Technologie ins Verhältnis zur gesamten Ausbringungsmenge über die Projektlaufzeit (T) gesetzt.⁴ Die Berechnung des Kosten-Nutzen-Index für die statische, semi-dynamische und dynamische Bewertung wird in Gleichung (4.24) gezeigt.

$$CB_j = \frac{LZK_j}{\sum_{t=1}^T \delta_t} \quad \forall j \in J \quad (4.24)$$

Wie zu Beginn des Kapitels erläutert, wird bei der statischen Bewertung ein idealisierter Wert für die jährliche Ausbringungsmenge (δ_t) angenommen und die Lebenszykluskostenbetrachtung ist begrenzt auf eine Anlage. Bei der dynamischen Bewertung wird hingegen für die jährliche Ausbringungsmenge (δ_t) die tatsächliche Menge zu Grunde gelegt. Für die Ermittlung der Lebenszykluskosten (LZK) werden für die statische Bewertung als Kostengrundlage historische und für die dynamische Bewertung projektspezifische Projektinformationen herangezogen. Im Falle der zweiten Bewertungsstufe, der semi-dynamischen Bewertung, werden mit Gleichung (4.25) und (4.26) die gegebenen unteren (–) und oberen (+) Intervallgrenzen für die Ausbringungsmenge (δ_t) und LZK berechnet, um den Kosten-Nutzen-Index (CB_j) zu ermitteln.

$$\delta_t = (\delta_{t-} + \delta_{t+}) \cdot \frac{1}{2} \quad (4.25)$$

$$LZK_j = (LZK_{j-} + LZK_{j+}) \cdot \frac{1}{2} \quad \forall j \in J \quad (4.26)$$

⁴ In der Literatur wird eine ähnliche aus den Lebenszykluskosten abgeleitete Kennzahl unter dem Begriff Life Cycle Performance (LCP) beschrieben, bei der die jeweilige Produktionsleistung ins Verhältnis zu den Lebenszykluskosten gesetzt wird (Fleischer, Weismann, Nesges & Wawerla, 2004).

Der Kosten-Nutzen-Index (CB_j) führt ausschließlich die Ergebnisse des Kostenmodells zusammen. Unsicherheiten finden bis zu dem Zeitpunkt keine Berücksichtigung. Hierzu erfolgt die Verknüpfung zwischen dem Kosten- und Unsicherheitsmodell in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden die deterministisch berechneten Werte des Kostenmodells durch die ermittelten Erwartungswerte (μ) der Kosten der unsicheren Einflussfaktoren ersetzt. Für den verwendeten Kosten-Nutzen-Index (CB_j) zur Berechnung der durchschnittlichen Kosten je Fügepunkt gilt somit nach dem ersten Integrationsschritt:

$$CB_j = \frac{LZK_j}{\sum_{t=1}^T \delta_t} \xrightarrow{\text{Integration des Erwartungswerts}} CB_j^\mu = \frac{\mu(LZK_j)}{\sum_{t=1}^T \delta_t} \quad \forall j \in J \quad (4.27)$$

Das Gesamtergebnis der ökonomischen Bewertung der Fügetechnologien unter Risiko kann anschließend mittels einer Kennzahl zur optimierten Entscheidungsfindung zusammengefasst werden. Zur Bewertung der Fügetechnologien wird mit dem Kosten-Index (KI) eine Verhältniskennzahl gebildet. Dabei wird der Kosten-Nutzen-Index der bewerteten Technologie (CB_j^μ) ins Verhältnis zu dem der günstigsten Technologie (CB_{min}^μ) gesetzt mit einem Lösungsbereich zwischen null und eins. Das Optimum der Bewertung liegt bei eins. Die Berechnung des KI wird in Gleichung (4.28) beschrieben.

$$KI_j = \frac{CB_{min}^\mu}{CB_j^\mu} \cdot \psi_j \quad \forall j \in J \quad (4.28)$$

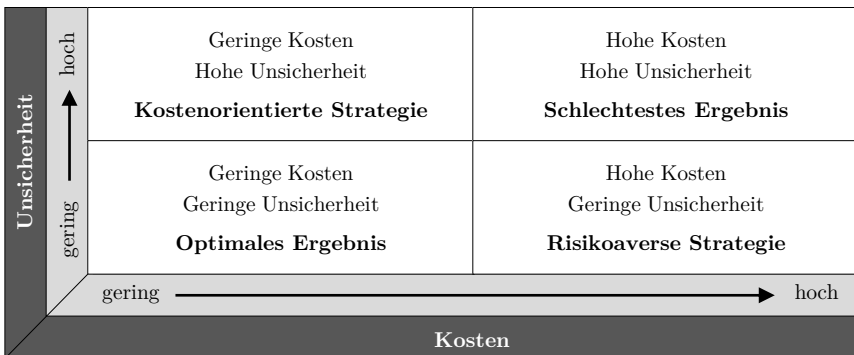


Abbildung 4.15: Vorstellung der Kosten-Unsicherheit-Matrix

Der zweite Integrationsschritt des Unsicherheitsmodells erfolgt durch die Ergänzung der Kennzahl um die Bewertung der ermittelten Unsicherheiten. Je größer die Standardabweichung bei der Bewertung einer Technologie, desto größer die Abwertung. Die Kennzahl

wird mit der Gleichung (4.23) beschrieben und ist entsprechend der Anforderungen der Stakeholder anpassungsfähig, um eine differenzierte Bewertungsaussage zu ermöglichen. Im Fall, dass beispielsweise keine Abwertung durch eine größere Standardabweichung einer Technologie erfolgen soll, wird der Gewichtungsfaktor $g^{\psi} = 0$ gesetzt. Der Gewichtungsfaktor wird abhängig von der Risikostrategie des Unternehmens mit einem entsprechenden Wert größer gleich null gewählt. Mögliche Strategien sind in Abbildung 4.15 innerhalb einer Kosten-Unsicherheit-Matrix dargestellt.

4.3 Ökologische Bewertung von Fügetechnologien

Das Ziel der zweiten Komponente der Auswahlwahlmethodik ist eine multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien, welche neben monetären (ökonomische) auch nicht-monetäre (ökologische, technologische) Kriterien umfasst. Folgender Abschnitt widmet sich der Entwicklung einer Methode zur ökologischen Bewertung von Fügetechnologien. Die Methode basiert auf den Phasen und Vorgaben einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 (2009). Neben den in der Norm definierten Festlegungen werden weitere Inhalte angepasst und ergänzt. Abbildung 4.16 zeigt die vier Phasen der Ökobilanzierung und die äquivalente Anpassung an die Vorgehensweise für die ökologische Bewertungsmethode der Fügetechnologien. Im Folgenden werden diese Schritte genauer erläutert.

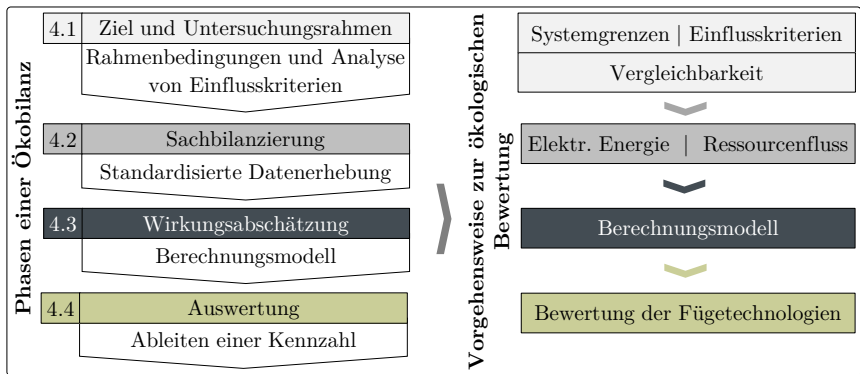


Abbildung 4.16: Adaption der Ökobilanzierung

4.3.1 Definition der Ziele und des Untersuchungsrahmens

In der ersten Phase werden alle grundlegenden Rahmenbedingungen der Untersuchungen definiert. Das Ziel der Bewertung von Fügetechnologien im Karosseriebau ist die

Ermöglichung einer Entscheidungsfindung aus ökologischer Sicht. Die Zielgruppe sind Entscheidungsträger aus den Abteilungen der Produktions- und Prozessplanung sowie Entwicklung. Die Anforderungen der Entscheidungsträger bestehen in einer transparenten und realistischen Bewertung. Zudem müssen die Vorgehensweise und die getroffenen Annahmen für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Verfahren einheitlich definiert sein.

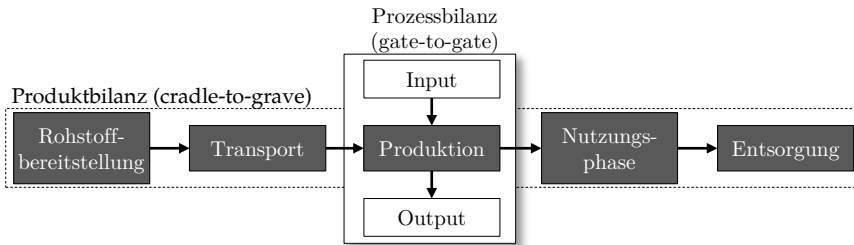


Abbildung 4.17: Systemabgrenzung Produkt- und Prozessbilanz

Eine Ökobilanz wird häufig für die Bewertung von Produkten angewendet. Der Untersuchungsrahmen dieser Arbeit bezieht sich auf die Bewertung von Prozessen. Abbildung 4.17 zeigt die Systemabgrenzung für die in dieser Arbeit durchzuführende Ökobilanz. In der Produktökobilanz (cradle-to-grave) wird ein Produkt vollständig von der Wiege bis zur Bahre verfolgt. Die Prozessbilanz kann als eine partielle Bilanz verstanden werden. Sie bilanziert nur einen Wertschöpfungsprozess in der gesamten Produktionskette⁵ (Jiménez-González, Kim & Overcash, 2000).

Definition der Systemgrenzen: Die Festlegung der Systemgrenzen nimmt bei der Entwicklung der Methode eine entscheidende Rolle ein. Sie definieren, welche Prozessmodule in der Bewertung berücksichtigt werden und somit auch den Umfang der Bilanzierung. Die Systemgrenzen sind so zu legen, dass trotz der Einschränkungen, repräsentative und realistische Ergebnisse für einen Vergleich möglich sind. Die Festlegung der Systemgrenze und somit deren Umfang hat auch Einfluss auf die geforderte Praxistauglichkeit.

Eine Bewertung der Fügetechnologien setzt voraus, dass auch ausschließlich diese bewertet werden. Ahnert et al. (2013) zeigen die Komplexität eines Betrachtungsraumes im Karosseriebau auf. Die Erfassung des tatsächlichen Energie- und Ressourcenbedarfs kann dabei anfangen von der Konstruktion am Computer bis hin zur Messeinrichtung

⁵ Fügetechnologien können durch das Einbringen eines Zusatzwerkstoffs (z. B. Nietelement) oder verschiedener Flanschbreiten das Gewicht eines Fahrzeugs beeinflussen und somit einen erhöhten Kraftstoffverbrauch verursachen. Da jedoch keine signifikante Gewichtszunahme durch den Einsatz einer Fügetechnologie identifiziert werden kann, wird die Nutzungsphase im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

für die Qualitätskontrolle erfolgen. Eine Zuordnung derartiger Prozessschritte ist für eine allgemeingültige Bewertung nicht möglich. Da der elementare Fügeprozess die Kernkomponente des Betrachtungsraumes sein soll, werden somit alle Energie- und Ressourcenflüsse, die während des Einsatzes der Füge Technologie im jeweiligen Produktionsort kontinuierlich eingesetzt werden, vollständig bilanziert. Der Fügeprozess kann neben integrierte auch vor- sowie nachgelagerte Prozesse umfassen.

Als integrierte Prozesse werden Vorgänge bezeichnet, die neben dem Fügeprozess zur Herstellung einer Fügeverbindung obligatorisch sind. Diese Prozesse sind zur Einhaltung einer qualitätsgerechten und sicheren Fügeverbindung notwendig. Beispielsweise weist die Füge Technologie Widerstandspunktschweißen ein starkes Verschleißverhalten der Schweißelektroden auf. Die sogenannten Elektrodenkappen legieren bei jeder Schweißung stets ein wenig am Werkstück an. Um die Qualität der Schweißpunkte sicherzustellen, werden die Elektrodenkappen in Abhängigkeit der zu fügenden Materialien und Qualitätsansprüche mit Hilfe eines Kappenfräsers überfräst bzw. zyklisch ausgetauscht. Die infolge des Fräsvorgangs anfallenden Späne werden mit Hilfe von Druckluft in ein Auffangbehältnis geblasen. Da diese Prozesse zur Funktionalität der Verbindungsherstellung beitragen, müssen die Einflüsse mit berücksichtigt werden.

Als vorgelagerte Prozesse bezeichnet man Schritte in einem Prozess, die in den meisten Fällen abgeschlossen sein müssen, damit der nächste Schritt ordnungsgemäß ausgeführt werden kann. Für die Bewertung der Füge Technologien aus ökologischer Sicht ist zum Beispiel das Vorbehandeln der Aluminiumoberflächen für thermische Fügeverfahren wichtig, bei der ein Reinigungsverfahren (z. B. WBK oder Laserreinigen) für das Sicherstellen einer qualitätsgerechten Fügeverbindung erforderlich ist. Als nachgelagerte Prozesse können z. B. Reinigungsstationen oder die Nacharbeit von Bauteilen verstanden werden. Bezogen auf die Systemgrenzen sind diese Prozesse zur Anwendung und Funktion der Technologien notwendig. Eine Zuordnung dieser Prozesse ist je nach Projekt unterschiedlich. Die Erfassung von Energie- und Ressourcenflüssen für vor- und nachgelagerte Prozesse ist daher sehr komplex.

Identifikation der Einflusskriterien für eine ökologische Bewertung: Im Folgenden werden die Einflusskriterien für die Auswahl der Füge Technologien aus ökologischer Sicht identifiziert, die in das zu entwickelnde Berechnungsmodell einfließen. Das Ishikawa-Diagramm in Abbildung 4.18 veranschaulicht die Einflusskriterien, die sich in technologische, prozess- und projektspezifische Kriterien aufteilen lassen.

Die *technologischen Kriterien* beinhalten die zu fügende MDK, das Gewicht der Zusatzwerkstoffe sowie die Festigkeit einer Fügeverbindung. In Abhängigkeit der definierten technologischen Kriterien werden die Prozessparameter angepasst, um die Qualitätsanforderungen an die Fügeverbindung zu erfüllen. Eine MDK hat somit direkten Einfluss auf die elektrischen Energiebedarfe. Das Gewicht der Zusatzwerkstoffe, wie z. B. eines Fügeelements, führt zum Anstieg des Fahrzeuggewichts. Das Gewicht der Karosserie

hat dabei großen Einfluss auf den CO₂-Ausstoß, insbesondere in der Nutzungsphase. Da diese in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet wird, spielt nur die Herstellung dieser Elemente bzw. Zusatzwerkstoffe für die ökologische Bewertung eine Rolle.

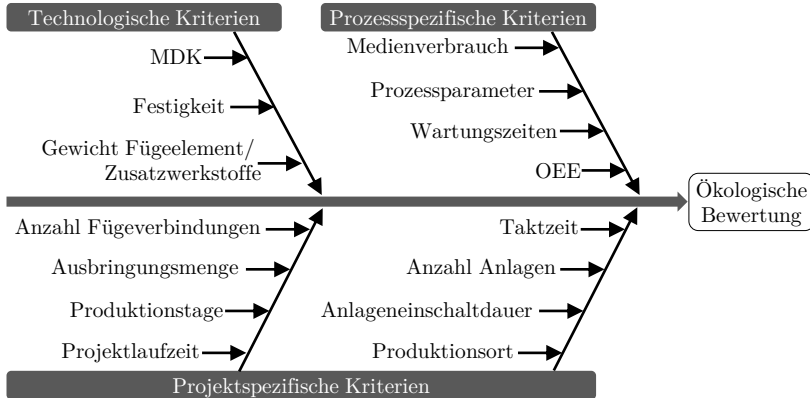


Abbildung 4.18: Identifikation der Einflusskriterien für eine ökologische Bewertung

Aufgrund der Bewertung von unterschiedlichen Füge Technologien haben die *prozessspezifischen Kriterien* einen großen Einfluss. Für eine ökologische Bewertung haben insbesondere die unterschiedlichen Energie- und Ressourcenverbräuche eine entscheidende Bedeutung. Bei der Wahl der Prozessparameter muss darauf geachtet werden, dass seriennahe bzw. serienreife Verbindungen gefügt werden. Auch hier gibt es minimale und maximale Grenzen der Prozessparameter, die einen deutlichen Einfluss auf die benötigte Energie haben. Des Weiteren definieren sich alle Füge Technologien über ihre Prozesszeit. Auch die Wartungszeiten (Wartungsenergie) sind bei der Bewertung zu berücksichtigen. Geplante Wartungszeiten wie z. B. der Kappenfräsvorgang können dabei genau berechnet werden. Außerdem spielt die Anlagenverfügbarkeit *OEE* eine wichtige Rolle.

Für eine ganzheitliche Abbildung der ökologischen Auswirkungen müssen auch *projektspezifische Kriterien* (Produktionsdaten) einbezogen werden. Mit der Anzahl an Fügeverbindungen pro Bauteil und der Ausbringungsmenge erfolgt eine Abschätzung der Energie- und Ressourcenbedarfe. Mit den weiteren Kriterien soll in Abhängigkeit der Zeiten abgeschätzt werden, wieviel elektrische Energie während der Projektlaufzeit verbraucht wird.

Definition der funktionellen Einheit: Nach DIN EN ISO 14040 (2009) kann mit der funktionellen Einheit der Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung in einer Ökobilanzstudie quantifiziert werden. Dazu muss die funktionelle Einheit eindeutig festgelegt und messbar sein, um dem Ziel der Studie zu entsprechen. Speziell für vergleichende

Ökobilanzen spielt die funktionelle Einheit und die dazu quantifizierten Referenzflüsse eine wichtige Rolle. Daher muss eine Vergleichseinheit festgelegt werden, auf Basis derer Bewertungen und Entscheidungen getroffen werden können.

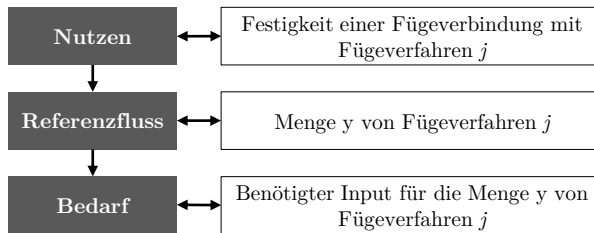


Abbildung 4.19: Zusammenhang zwischen funktioneller Einheit (Nutzen) und Bedarf einer Füge Technologie in Anlehnung an Stephan (2007)

Der Nutzen einer Verbindungsherstellung besteht darin, zwei oder mehrere Werkstücke möglichst fest miteinander zu verbinden. Dabei sind die Verbindungsstellen für den Zusammenhalt von Bauteilen von hoher Bedeutung, da diese oftmals eine der Schwachstellen des Verbundes darstellen. In Stephan (2007) sowie Tölle und Schmidt (2009) sind bereits Untersuchungen des Festigkeitsverhaltens verschiedener Verbindungsarten durchgeführt worden. Bezogen auf die funktionelle Einheit stellt die Festigkeit einen quantifizierbaren und eindeutig messbaren Nutzen dar. Somit kann, wie in Abbildung 4.19 aufgezeigt, der Bedarf an Energie- und Ressourcenflüssen (Referenzfluss) zur Erfüllung des Nutzens quantifiziert werden. Mit dem Ergebnis dieser Quantifizierung können anschließend über zugeordnete Indikatoren die Umweltauswirkungen berechnet werden.

4.3.2 Sachbilanzierung: Ermittlung ökologischer Einflussfaktoren

Nach der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens findet die Sachbilanzierung statt. Die Sachbilanz umfasst eine Auflistung von Energie- und Stoffbilanzen, die sich anhand einer definierten Systemgrenze ergeben. Die Erstellung einer Sachbilanz ist nach DIN EN ISO 14040 (2009) die aufwendigste Phase einer Ökobilanz, da häufig die benötigten Daten nicht oder nur teilweise vorhanden sind. Weiterhin sind gemessene Energiedaten von den Lieferanten meist nicht hinreichend aussagekräftig und daher für eine Sachbilanzierung nur bedingt geeignet. Insbesondere der Anspruch an die Datenqualität muss hierbei berücksichtigt werden.

Deshalb ist ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit, eine Vergleichbarkeit zu generieren, die eine objektive Gegenüberstellung der untersuchten Technologien ermöglicht. Das primäre Ziel ist es, quantifizierte Aussagen über den Energie- und Ressourcenbedarf aller Füge Technologien treffen zu können. Zur Gewährleistung dessen müssen entscheidende Rahmenbedingungen für die Untersuchungen festgelegt werden. Um einen Prüfzyklus

definieren zu können, bedarf es dem Wissen der energetischen Einflussfaktoren. In Abbildung 4.20 sind die einzelnen Bearbeitungspunkte dargestellt, die das Ziel haben, unter all diesen Gesichtspunkten vergleichbare Bedingungen zu schaffen. Deshalb müssen im ersten Schritt die Faktoren, die einen Einfluss auf die Messergebnisse haben, identifiziert und analysiert werden. Auf Basis dessen kann anschließend ein transparenter und aussagekräftiger Energiereferenzzyklus definiert werden.

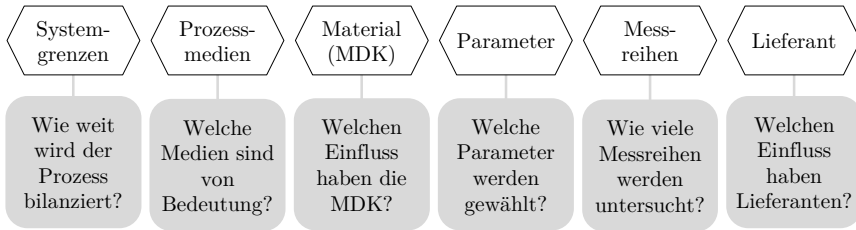


Abbildung 4.20: Relevante Einflussfaktoren für die Erstellung der Sachbilanz

Die Systemgrenzen wurden für die ökologische Bewertung bereits im vorausgegangenen Abschnitt definiert. Die zu erfassenden Prozessmedien beziehen sich auf die definierte Systemgrenze. Es werden alle Medien, die dem Fügevorgang direkt zuzuschreiben sind, erfasst. Darunter fallen die elektrische Energie und die benötigten Hilfsstoffe, wie zum Beispiel ein Fügeelement oder Drahtwerkstoff. Im Hinblick auf die Entscheidungsfindung und Vergleichbarkeit müssen die Energiemessungen an gleichen Bauteilen und Materialien durchgeführt werden. Deshalb ist auch die Wahl der zu fügenden MDK von entscheidender Bedeutung. Insbesondere bei den thermischen Füge Technologien muss für dickwandige Werkstoff-Kombinationen vergleichsweise mehr Energie aufgebracht werden, um eine erforderliche Prozesstemperatur zu erreichen. Folglich nehmen auch die Fügeparameter eine wichtige Rolle ein. Für die Untersuchung wird die Anzahl der zu fahrenden Messreihen, sowie die Anzahl an Fügeverbindungen definiert. Darunter fallen auch die Festlegungen der zur Verfügung stehenden Füge- und Pausenzeiten. Da für die im Karosseriebau eingesetzten Prozessgeräte unterschiedliche Lieferanten in Frage kommen, muss auch dieser Einfluss berücksichtigt werden.

Nachdem der Analyse der allgemeinen Einflussfaktoren auf die Energiebedarfe ist das Definieren der Voraussetzungen für die Datenerhebung erforderlich. Zur Spezifikation des Energiereferenzzyklus wird der Ansatz nach Kruska (2002) verfolgt und nach Abbildung 4.21 angepasst. Zudem wird der Prüfzyklus in Anlehnung an AIDA (2015) erstellt.

Analyse gemeinsamer Anwendungsfelder: Im Karosseriebau gibt es ein breites Spektrum an auftretenden MDK. Je nach Karosseriebauweise kommen diese unterschiedlich zum Einsatz. Weiterhin hängt die Auswahl einer Füge Technologie entscheidend von der zu

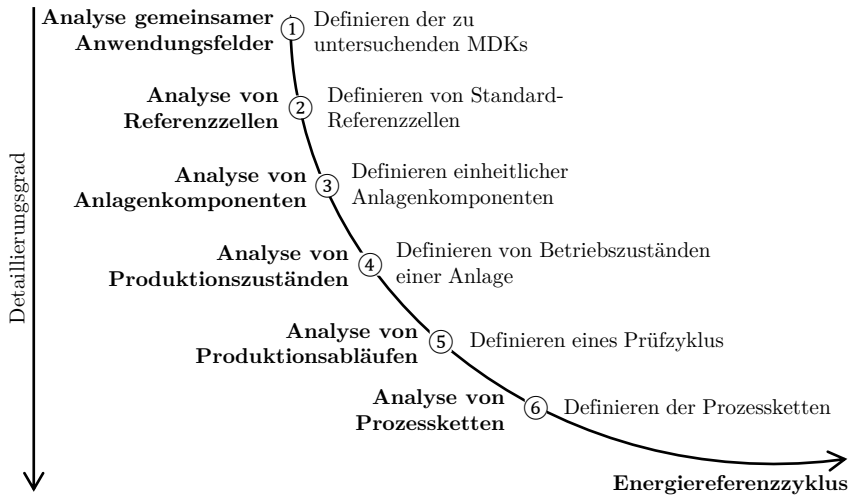


Abbildung 4.21: Aufbau und Erstellung der Energierferenzzyklen für die Vergleichbarkeit von Füge-technologien in Anlehnung an Haag (2013)

fügenden MDK ab. Unter Berücksichtigung der technologischen Realisierbarkeit werden alle Füge-technologien definierten MDK-Klassen zugeordnet. Die Klassen lassen sich in Aluminium-, weiche Mischbau-, harte Mischbau- und Stahlverbindungen einteilen und beliebig erweitern. In Tabelle 4.5 wurden exemplarisch MDK-Klassen nach Werkstoff-Dicke unterschieden, um eine detailliertere Aussage treffen zu können.

Tabelle 4.5: Auswahl und Zuordnung der definierten MDKs

	Aluminium		Mischbau		Stahl	
	MDK 1	MDK 2	MDK 3	MDK 4	MDK 5	MDK 6
LSS	✓	✓			✓	✓
FDS	✓	✓	✓	✓	✓	
Kleben	✓	✓	✓	✓	✓	✓
WPS	✓	✓			✓	✓
...	✓	✓			✓	✓

Analyse von Referenzzellen: Einheitliche Referenzzellen sind für eine transparente und realistische Bewertung notwendig. Um nachvollziehen zu können, welche Komponenten

für die Messungen berücksichtigt werden, müssen diese für alle Fügetechnologien definiert sein. Die Referenzzellen sollen dabei den Aufbau und die Ausstattung einer Zelle darstellen, wie sie in den meisten Fällen in der Serie eingesetzt werden. In Abbildung 4.22 ist eine Standardreferenzzelle am Beispiel des Stanznietens dargestellt. Neben den Komponenten sind zusätzlich die Streckenverläufe der Steuerleitungen und des Zuführschlauchs abgebildet. Zusätzlich sind die Messstellen für die Druckluft und die der elektrischen Energie definiert. Der Vereinzeler ist für die Sortierung und Zuführung der Fügeelemente notwendig. Die Stromversorgung dessen erfolgt über den Schrank.

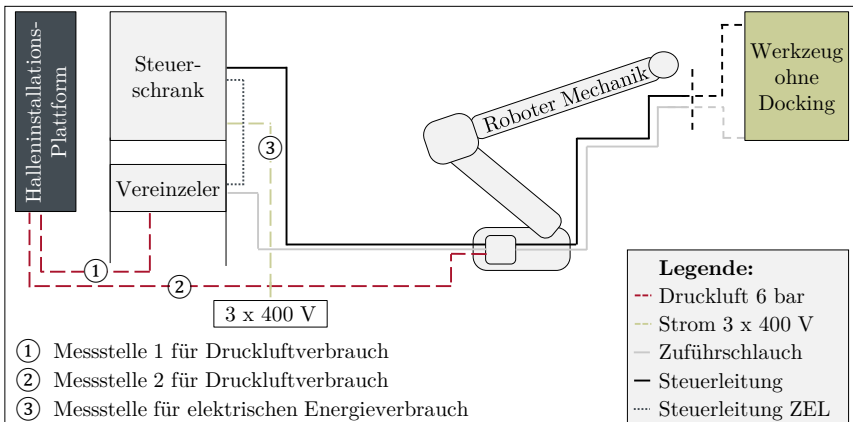


Abbildung 4.22: Blockschaltbild einer Referenzzelle mit Streckenverlauf der Zuleitungen am Beispiel des Stanznietens

Analyse von Anlagenkomponenten: Um eine Vergleichbarkeit der Fügetechnologien untereinander zu gewährleisten werden Komponenten mit gleichen Funktionen einheitlich abgebildet. Zum Beispiel erfolgt die Zuführung der Fügeelemente zum Prozessgerät über einen Profilschlauch. Damit ein objektiver Vergleich des Druckluftverbrauchs erfolgen kann, muss beispielsweise eine einheitliche Zuführschlauchlänge definiert werden. Tabelle 4.6 zeigt einen Ausschnitt aus dem Energiereferenzzyklus für die Fügetechnologie Stanznieten.

Analyse von Produktionszuständen: Der jeweilige Energiebedarf einer Produktionsanlage kann nach Bornschlegl (2016) einzelnen Anlagenzuständen zugeordnet werden. Der Zustand einer Anlage hängt dabei vom jeweiligen Produktionszustand ab. Im Zustand *off* beispielsweise ist die Anlage vollständig abgeschaltet und der benötigte Energiebedarf liegt bei null.

Tabelle 4.6: Definition der Komponenten für den Prüfaufbau (Beispiel Stanznieten)

Komponente	Anmerkung
Nietwerkzeug (Stempel, Matrice)	–
Versorgungseinheit/-steuerung	–
Nietzuführung	Ohne Vorvereinzelung Zuführgeschwindigkeit: 12 m/s
Antrieb	Elektromotorisch
Steuerung und Zuführung	Standard Roboterleitungspaket: 10m Bodenpaket, Länge Zuführschlauch: 16m, Format Zuführschlauch: 5er-Niet
Bedienpanel	–

Im *betriebsbereiten* bzw. *Standby-Zustand* sind sämtliche Geräte auf ein energetisch niedriges Niveau abgesenkt. Ein störungsfreier Wiederanlauf soll kurzfristig erfolgen können. Der Zustand *produktionsbereit* stellt die Voraussetzung, dass die Anlage verzögerungsfrei in den Zustand *Produktion* versetzt werden kann. Die Anlage wartet in diesem Zustand auf einen Befehl zur Fertigungsausführung. Im Zustand *Produktion* führt die Anlage ihren vorgesehenen Arbeitsprozess aus. Dabei sind alle notwendigen Komponenten im Nennbetrieb. Der Energiebedarf ist hier i.d.R. am höchsten. Zusätzlich können Wartungen und Störungen an einer Anlage auftreten. Je nach Art und zeitlichem Bedarf für die Wartung oder Störung befindet sich die Anlage im Zustand *betriebsbereit* oder *produktionsbereit*. In Tabelle 4.7 sind die Anlagenzustände definiert, die für die Erstellung des Energiereferenzzyklus und einer Energieprognose notwendig sind.

Analyse von Produktionsabläufen: Mit den definierten Produktionszuständen kann der Prüfzyklus definiert werden. Für die Ermittlung der Energiebedarfe wird versucht, möglichst nahe Produktionsbedingungen abzubilden. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Prozesszeiten (τ^f) der Füge-technologien und Verfahrenzeiten (τ^v) wird festgelegt, dass innerhalb einer Produktionsphase eine definierte Anzahl an Fügeverbindungen gesetzt werden. Diese müssen innerhalb der vorgegeben Taktzeit (τ^Z) erfolgen. Abbildung 4.23 zeigt den schematischen Ablauf einer Produktionsphase.

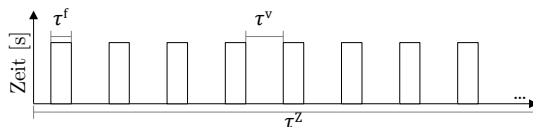


Abbildung 4.23: Schematische Darstellung einer Produktionsphase

Tabelle 4.7: Definition der Betriebszustände einer Anlage für den Energiereferenzzyklus

Produktionszustand	Definition	Notation
Aus	Die Anlage ist ausgeschaltet.	–
Betriebsbereit/Standby	Im betriebsbereiten Zustand sind sämtliche Geräte auf ein energetisch niedriges Niveau abgesenkt. Ein störungsfreier Wiederanlauf in den Betriebszustand <i>produktionsbereit</i> soll zeitgerecht erfolgen.	P_{SB}
Produktionsbereit	Die Anlage kann verzögerungsfrei in den Zustand <i>Produktion</i> gesetzt werden. Alle Komponenten sind somit aktiv.	P_{PB}
Produktion	Die Anlage befindet sich im Produktionsmodus. Alle notwendigen Komponenten sind im Nennbetrieb.	P_P
Wartung/Störung	Die Anlage befindet sich je nach zeitlichem Bedarf für die Wartung/Störung im produktionsbereiten oder betriebsbereiten Zustand.	P_W

Nach der Produktionsphase erfolgt eine definierte und einheitliche Pause für alle Füge-technologien. In dieser Zeit können die Probebleche ausgetauscht werden. Die Anlage befindet sich dabei im Zustand *produktionsbereit* oder *Standby*. Tabelle 4.8 zeigt einen exemplarischen Ablauf des Prüfzyklus.

Tabelle 4.8: Exemplarischer Ablauf des Prüfzyklus

Start	Ende	Dauer [min]	Phase des Prüfzyklus
00:00	02:00	2	P1 - Starten P_{PB}
02:00	03:00	1	P2 - Produktionsphase P_P
03:00	05:00	2	P3 - Pause P_{SB}
05:00	06:00	1	P2 - Produktionsphase P_P
06:00	08:00	2	P3 - Pause P_{SB}
08:00	09:00	1	P2 - Produktionsphase P_P

Analyse von Prozessketten: Mithilfe eines Prozessablaufes können die relevanten Verbräuche eines Fügevorgangs identifiziert werden. In Abbildung 4.24 ist exemplarisch der Prozessablauf für die Technologie Widerstandspunktschweißen dargestellt. Mit Hilfe dieser Darstellung können die relevanten Energie- und Stoffflüsse ermittelt werden. Durch die vorgenommenen Festlegungen können nun unter gleichen Voraussetzungen

Energiemessungen durchgeführt werden. Im Folgenden wird das Vorgehen für die Wirkungsabschätzung aufgezeigt.

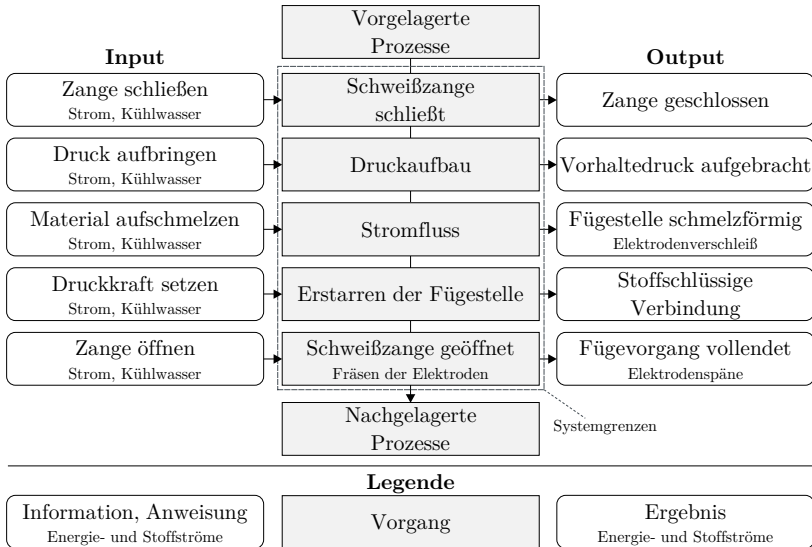


Abbildung 4.24: Schematischer Prozessablauf am Beispiel der Füge Technologie WPS in Anlehnung an Bornschlegl (2016)

4.3.3 Wirkungsabschätzung: Entwicklung des Berechnungsmodells

Mit den im Rahmen der Sachbilanz gewonnenen Daten erfolgt die Wirkungsabschätzung, um die Sachbilanzdaten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu bewerten. Das Ziel ist eine Bereitstellung von Informationen zur Unterstützung der Einschätzung der Ergebnisse, um deren Umweltauswirkungen nachzuvollziehen. Nachfolgend wird die Vorgehensweise zur Berechnung der Umweltauswirkungen von Füge Technologien beschrieben.

Indikatoren für die Abschätzungen der Umweltauswirkungen: Ein reiner Vergleich der Energie- und Ressourcenflüsse über die Sachbilanzierung reicht für eine ökologische Bewertung nicht aus.⁶ Um die aus der Sachbilanzierung ermittelten Daten in der Wirkungsabschätzung weiter zu verarbeiten und Indikatorwerte zu bestimmen, existieren

⁶ Für ein besseres Verständnis des folgenden Kapitels müssen die o. g. Begriffe abgegrenzt werden. Mit dem Begriff *Energie* sind alle Leistungsbedarfe über einen definierten Zeitraum definiert. Der Begriff *Ressource* bezeichnet diejenigen Stoffe und Materialien, die für den elementaren Fügeprozess benötigt werden.

verschiedene Methoden, die unterschiedliche Kategorien und Charakterisierungsmodelle beinhalten.⁷ Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete Methode CML 2002 verfolgt beispielsweise einen Mid-Point-orientierten Ansatz, der unmittelbar auf die Umsetzung der Vorgaben der DIN EN ISO 14040 (2009) sowie auf Prozessebene angewendet werden kann. Weiterhin umfasst sie Faktoren für die Normierung. Die CML-Methode ist eine auswirkungsorientierte Methode, die auf einer wissenschaftlichen Basis aufgebaut ist. Sie stellt aufgrund ihrer naturwissenschaftlichen Fundierung, einer hohen Transparenz und ihrer Vollständigkeit die am weitesten verbreitete und eine international akzeptierte Methode dar (Schrack, 2015). Die CML-Methode weist mehrere Wirkungskategorien auf. Eine Gewichtung dieser unterschiedlichen Wirkungskategorien ist nicht möglich. Für die Bewertung der Fügetechnologien wird daher lediglich auf die Wirkungskategorie Treibhauspotential (engl. Global Warming Potential GWP) Bezug genommen. Das Treibhauspotential beschreibt den potentiellen Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten d. h. zum sogenannten Treibhauseffekt. Der Beitrag des Stoffes wird als GWP-Wert (in der Einheit kg CO₂-Äquivalente) relativ zu dem Treibhauspotential des Stoffes Kohlendioxid (CO₂) angegeben. Der Beitrag eines Stoffes zum Treibhauseffekt wird für die Bewertung gemittelt über den Zeitraum von 100 Jahren. Daher wird er auch häufig als GWP100 angegeben (Reinhardt, 2014).

In Abbildung 4.25 ist in einer Black-Box-Darstellung nach Feldhusen und Grote (2013) die vereinfachte Berechnung und Klassifizierung der Umweltbelastungen dargestellt. Über die generierten Indikatorwerte können die unterschiedlichen Energie- und Ressourcenflüsse über die Einheit kg CO₂-Äquivalente verrechnet und bewertet werden. Viele Indikatorwerte für Ressourcen können über frei verfügbare Bibliotheken wie beispielsweise dem Webportal ProBas oder teilweise auch über Lieferanten bestimmt werden.

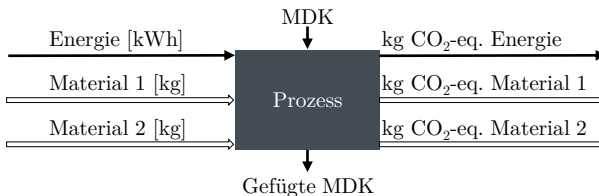


Abbildung 4.25: Berechnung und Klassifizierung der Umweltbelastungen

Jedoch ist zu berücksichtigen, dass die Verwendung unterschiedlicher Quellen für die Indikatorwerte sowie Wirkungsabschätzung auf die Umwelt zu abweichenden Werten führen kann. So zeigt sich beispielsweise über die CML-Bilanzierung, dass die Herstellung einer kWh Stroms im deutschen Strommix mit einer Emission an treibhauswirksamen Gasen von 0,61 kgCO₂-Äquivalenten verbunden ist. Im Vergleich dazu weist die ProBas

⁷ Eine umfassende Übersicht existierender Methoden zur Wirkungsabschätzung ist Reinhardt (2014) zu entnehmen.

Bibliothek für die gleiche Stromherstellung eine Emission von 0,59 kgCO₂-Äquivalenten auf. Tabelle 4.9 zeigt einen Ausschnitt der verwendeten Daten zur Abschätzung der Umweltauswirkungen.

Tabelle 4.9: Ausschnitt verwendeter Indikatoren für die Wirkungsabschätzung

Referenzart	Bezugseinheit	kgCO ₂ -Äquiv.	Quelle
Strommix DE	kWh	0,61	CML 2001 – April 2015
Strommix EU	kWh	0,47	CML 2001 – April 2015
Argon (gasförmig)	kg	0,30	CML 2001 – Januar 2016
Kupferdraht	kg	4,20	ProBas
Stahldraht	kg	2,17	ProBas
Fügeelement	kg	0,58	Lieferant

Berechnungsmodell zur Bestimmung der Energie- und Ressourcenflüsse: Mit den ermittelten Indikatorwerten können zur ökologischen Bewertung im Berechnungsmodell die Energie- und Ressourcenflüsse bestimmt werden. Zur Ermittlung des GWP wird die Summe aller benötigten Energien (E_i) und Ressourcen (R_i) unter Berücksichtigung der definierten Systemgrenze und der jeweiligen Indikatorwerte bestimmt.⁸

$$\text{GWP}_j = s^I \cdot \sum_{i=1}^n E_{ij} + \sum_{i=1}^n (R_{ij} \cdot r_i^I) \quad \forall j \in J \quad (4.29)$$

Der Indikator s^I hängt von der jeweiligen Stromherstellung bzw. dem Produktionsort ab. Da unterschiedliche Ressourcen für alle Füge Technologien zum Einsatz kommen, müssen diese mit dem zugehörigen Indikatorwert r_i^I berechnet werden. Die Berechnung des GWP wird in Gleichung (4.29) aufgezeigt. Im Vergleich zu der Energie werden Ressourcen ausschließlich während des Fügeprozesses verbraucht. Deshalb wird der Bedarf an benötigten Ressourcen über die Anzahl an Fügeverbindungen pro Bauteil und den Bauteilen pro Tag bilanziert. Da in der frühen Entwicklungsphase oftmals keine zuverlässigen Projektdaten verfügbar sind, bezieht sich die Bestimmung des GWP in der statischen Bewertungsstufe ausschließlich auf die Herstellung einer Fügeverbindung (FV). Mit fortschreitendem Entwicklungsstand und höherer Datenverfügbarkeit können in den folgenden Bewertungsstufen Energie- und Ressourcenflüsse akkurater prognostiziert werden (siehe Kapitel 3.2.2). Abbildung 4.26 liefert eine Übersicht der grundsätzlichen Quantifizierung und Berechnung der Energie- und Ressourcenflüsse.

⁸ Umgangssprachlich werden Energiebedarf und Energieverbrauch synonym gebraucht. Im Folgenden wird der Begriff Energieverbrauch in Bezug auf Messungen verwendet. Dadurch charakterisiert der Energieverbrauch die für einen Prozess eingesetzte Energiemenge. Der Begriff Energiebedarf wird für prognostizierte Werte und somit theoretische Annahmen verwendet (Friedrich, 2013).

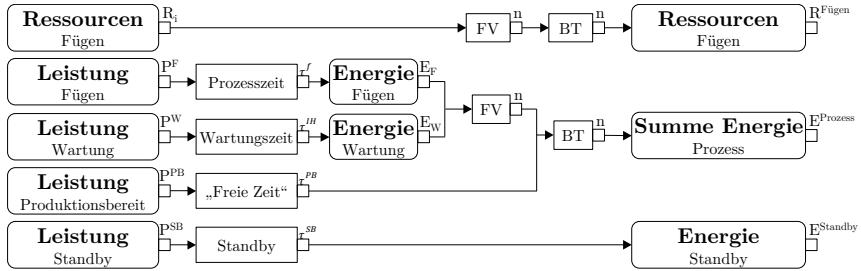


Abbildung 4.26: Quantifizierung und Modellierung der Energie- und Ressourcenflüsse

Für eine Prognose des Energiebedarfs ist es notwendig, die Zeiten für die unterschiedlichen Produktionszustände zu ermitteln. Mit diesen Zeiten können die ermittelten Leistungsbedarfe verrechnet werden. Für die Abschätzung des Energiebedarfs einer Fügetechnologie wird der Tagesbedarf nach Gleichung (4.30) unterteilt in Energie für den Prozess $E^{Prozess}$ und Energie für die geplante Nichtnutzung $E^{Standby}$ einer Anlage.

$$E_j^{Gesamt} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \right] = E_j^{Prozess} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \right] + E_j^{Standby} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{Tag}} \right] \quad (4.30)$$

Mit Hilfe der Anlagen-Einschaltdauer kann die Standby-Zeit bestimmt werden, d.h. die Zeit, in der eine Anlage nicht im Einsatz ist. Zur Ermittlung von $E^{Standby}$ wird nach Gleichung (4.31) das Produkt der Anzahl an Schichten (S) sowie der Einschaltdauer pro Schicht (τ^{ES}) von der Gesamtzeit eines Tages (τ^G) abgezogen. Da sich die Anlage in dieser Zeit im Standby-Zustand befindet, wird die Zeit mit der Standby-Leistung (P^{SB}) einer Fügetechnologie multipliziert. Des Weiteren muss der in Gleichung (4.3) ermittelte Bedarf an Systemen (A_j) berücksichtigt werden.

$$E_j^{Standby} = \frac{\tau^G - (S \cdot \tau^{ES})}{60} \cdot P_j^{SB} \cdot A_j \quad (4.31)$$

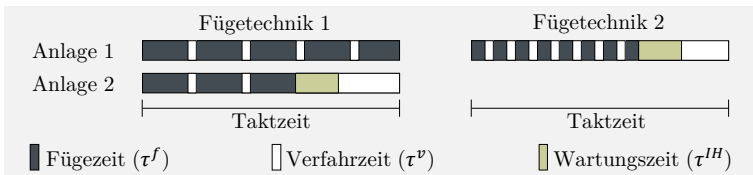


Abbildung 4.27: Ermittlung der Anlagenbedarfe in Abhängigkeit der Prozess-, Verfahr-, und Wartungszeiten

Zur Herstellung einer Fügeverbindung besitzen die Fügetechnologien unterschiedliche Fügezeiten (τ^f). Diese bestimmen daher, wie viele Fügeverbindungen innerhalb der Taktzeit gesetzt werden können. Besteht die Anforderung, dass eine gewisse Anzahl an Fügeverbindungen innerhalb einer gegebenen Taktzeit gesetzt werden muss, kann es vorkommen, dass für eine Fügetechnologie mit einer höheren Fügezeit ein zusätzliches System notwendig ist. Abbildung 4.27 veranschaulicht diesen Fall.

Der Energiebedarf für den Prozess entsteht während der Einschaltdauer einer Anlage. Da an dieser Stelle mehrere Leistungsarten vorkommen, werden diese in drei Funktionen unterteilt:

$$E_j^{Prozess} = f_j^F + f_j^W + f_j^{PB} \quad (4.32)$$

Die Funktion f_j^F beinhaltet den elektrischen Energiebedarf für die einzelnen Fügeprozesse (u). Dieser wird in Abhängigkeit der Fügeverbindungen pro Bauteil (δ^b), der Leistung während des Fügens (P^F) sowie der Anzahl an Fahrzeugen (F) pro Tag mit der Gleichung (4.33) ermittelt.

$$f_j^F = \delta^b \cdot F \cdot \sum_{u=1}^n (P_{ju}^F \cdot \tau_{ju}^f) \quad (4.33)$$

Die Funktion f_j^W bestimmt mit der Gleichung (4.34) den Bedarf an Energie für notwendige Wartungsvorgänge (ϖ), die innerhalb der Taktzeit durchgeführt werden müssen. Dazu zählt zum Beispiel der Kappenfräsvorgang beim Widerstandspunktschweißen, der eine bestimmte Leistung im Wartungszustand (P^{SB}) aufweist. Die Standmenge (Ω_ϖ) kann dabei je nach zu fügendem Bauteil und Verbindungsanforderung variieren.

$$f_j^W = \sum_{\varpi=1}^n \frac{(P_{j\varpi}^{SB} \cdot \tau_{j\varpi}^{IH}) \cdot \delta^b \cdot F}{\Omega_\varpi} \quad (4.34)$$

Die Funktion f_j^{PB} bestimmt mit der Gleichung (4.35) den Energiebedarf im produktionsbereiten Zustand der Anlage. Dazu gehören beispielsweise Verfahzeiten, die Zeiten während eines Wartungsvorgangs oder die Zeit bis zum nächsten Bauteil, in der eine produktionsbereite Anlage einen bestimmten Leistungsbedarf (P^{PB}) aufweist.

$$f_j^{PB} = (A_j \cdot \tau_j^Z - \delta^b \cdot \tau_j^f) \cdot F \cdot P_j^{PB} \quad (4.35)$$

Mit Hilfe dieser Berechnungen kann abgeschätzt werden, wie viel elektrische Energie eine Technologie mit ihren Anwendungseigenschaften, wie z. B. den Fügezeiten, während der Produktion verbraucht. Der materielle Verbrauch R_i ist zeitlich unabhängig. Daher hängt dieser Bedarf ausschließlich mit der Anzahl an Fügeverbindungen und Bauteilen zusammen.

$$\text{GWP}_j = \frac{(s^I \cdot E_j^{Gesamt} + \sum_{i=1}^n (R_{ij} \cdot r_i)) \cdot dt}{\delta^b \cdot \delta_t} \quad (4.36)$$

Zur Bestimmung des GWP einer Füge­technologie werden alle Bedarfe mit den jeweiligen Indikatoren verrechnet. Für eine Abschätzung der Umweltauswirkungen über die Projektlaufzeit (T) wird der ermittelte Tagesbedarf in Gleichung (4.29) um die Anzahl an Produktionstagen pro Jahr (d^t), der Anzahl an Fügeverbindungen (δ^b) sowie der jährlichen Ausbringungsmenge (δ_t) erweitert. Durch die Erweiterung erfolgt in Gleichung (4.36) eine Normierung des GWP auf eine Füge­verbindung.

Zusammenfassung der untersuchten Umweltauswirkungen: Als Größenordnung zeigt Abbildung 4.28 exemplarisch die Zusammensetzung der in diesem Abschnitt untersuchten Energie- und Ressourcenflüsse für jeweils zwei repräsentative mechanische sowie thermische Füge­technologien.⁹ Für die linienförmigen Verfahren wird im Rahmen der Bewertung eine 25 mm lange Fügenaht angenommen. Als Indikator für die Stromherstellung wurde der deutsche Strommix herangezogen. Dabei wird ersichtlich, dass insbesondere der Einfluss von Druckluft bei den mechanischen Verfahren und der Energiefluss bei den thermischen Technologien einen hohen Anteil an den gesamten Umweltauswirkungen darstellen. Weiterhin stellt der Ressourcenfluss bei Technologien, die einen Einsatz von Hilfsstoffen (z.B Kupferdraht) erfordern, die höchste Umweltbelastung dar.

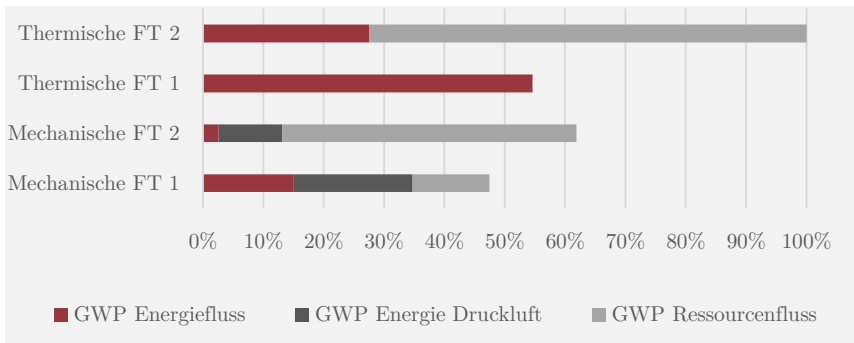


Abbildung 4.28: Zusammensetzung des GWP für die Herstellung einer Füge­verbindung

4.3.4 Berechnung der ökologischen Bewertungskennzahl

Um die Ergebnisse der ökologischen Bewertung in eine Kennzahl zusammenzuführen, werden über den Sustainability-Index SI_j die Umweltauswirkungen einer Füge­technologie (GWP_j) ins Verhältnis zur Füge­technologie mit der geringsten Umweltbelastung (GWP_{min}) gesetzt. Des Weiteren wird die Kennzahl mit der Festigkeit (y) bzw. den

⁹ Auf konkrete Daten sowie Bezeichnungen wird an dieser Stelle aus Gründen der Geheimhaltung verzichtet.

quantifizierten Nutzen einer Fügetechnologie erweitert. Die maximale Festigkeit (y_{max}) wird hier als Bezugsgröße gewählt. Somit wird eine dimensionslose Kennzahl für die Bewertung der Fügetechnologien mit einem Lösungsbereich zwischen null und eins generiert, wobei das Optimum der Bewertung bei eins liegt. Die Berechnung des SI wird in Gleichung (4.37) beschrieben.

$$SI_j = \frac{GWP_{min}}{GWP_j} \cdot \frac{y_j}{y_{max}} \quad \forall j \in J \quad (4.37)$$

Die Auswirkungen der funktionellen Einheit auf die Bewertung der Fügetechnologien werden in Tabelle 4.10 exemplarisch aufgezeigt. Fügetechnologie 1 zeigt sich im Vergleich zu den Fügetechnologien 2 und 3 aufgrund des geringeren GWP als die umweltfreundlichste Fügetechnologie. Findet der Vergleich bzw. die Bewertung über die Festigkeit statt, stellt sich aus ökologischer Sicht aufgrund deren höheren Festigkeit Fügetechnologie 2 als optimale Wahl heraus. Beispielsweise müsste Fügetechnologie 1 zur Erreichung der Festigkeit von drei Fügeverbindungen der Fügetechnik 2 insgesamt vier Fügeverbindungen setzen. Folglich weist die Fügetechnologie 2 den höchsten SI auf.

Tabelle 4.10: Exemplarische Darstellung der Kennzahl SI über die funktionelle Einheit

Fügetechnologie j	GWP _{j} [kgCO ₂]	y_j [N]	SI_j
Fügetechnologie 1	5	5000	0,71
Fügetechnologie 2	6	7000	0,83
Fügetechnologie 3	6	5000	0,60

Die ökologische Bewertung benötigt analog zur ökonomischen Bewertung projekt- sowie prozessspezifische Daten. Aufgrund der in Kapitel 3.2.2 diskutierten Problematik hinsichtlich der unzureichenden Datenverfügbarkeit in der frühen Produktentstehungsphase, erfolgt die ökologische Bewertung in drei Stufen: der statischen, semi-dynamischen und dynamischen Bewertung. In der statischen Bewertung ist die Datenverfügbarkeit sehr begrenzt. Daher werden in dieser Phase lediglich die Energie- und Ressourcenflüsse für die Herstellung einer Fügeverbindung über gemittelte Werte bilanziert. In der semi-dynamischen Bewertung stehen hingegen die erforderlichen Daten bereits als eine erste Näherung in Intervallbereichen zur Verfügung, um das günstigste und ungünstigste Szenario abbilden zu können. In der dynamischen Bewertungsstufe sind Daten wie beispielsweise Prozesszeiten für das zu fügende Bauteil vollständig vorhanden. Dadurch wird eine sehr präzise ökologische Bewertung der Fügetechnologien ermöglicht.

4.4 Technologische Bewertung von Fügetechnologien

Neben den ökologischen Aspekten sind insbesondere technologische Kriterien wie beispielsweise Flanschbreite oder Festigkeit von hoher Bedeutung, um einen definierten

Qualitätsstandard gewährleisten zu können. Daher vervollständigt die Berücksichtigung des technologischen Einflusses die zweite Komponente der Auswahlmethodik. Folgender Abschnitt widmet sich der Detaillierung der technologischen Bewertungsmethodik, die neben quantitativen Kriterien mit physikalischen Indikatoren auch qualitative Kriterien mit subjektiven Werten zur Bildung einer Bewertungskennzahl quantifiziert. Hierzu werden im ersten Schritt die einzelnen Einflussfaktoren identifiziert, bevor diese innerhalb des Evaluationsmodells bewertet werden. Da die Einflussfaktoren in der Realität unterschiedliche Prioritäten aufweisen können, wird des Weiteren die Bewertung durch ein Gewichtungsmodell ergänzt.

4.4.1 Charakterisierung technologischer Einflusskriterien

Ziel der technologischen Bewertung ist eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Fügetechnologien. Daher werden im ersten Schritt über verschiedene Literaturanalysen, Studien sowie Expertengesprächen die relevanten Einflusskriterien identifiziert. Diese werden in quantitative und qualitative Kriterien unterteilt. Ein Ausschnitt quantitativer und qualitativer Einflusskriterien zur technologischen Bewertung von Fügetechnologien wird im Folgenden aufgezeigt.

	Quantitative Kriterien
Gewicht Zusatzwerkstoff:	Teilweise benötigen Fügetechnologien für den Fügeprozess einen Zusatzwerkstoff, wie beispielsweise ein Nitelement oder einen Fügedraht.
Minimale Flanschbreite:	Die Flanschbreite ist der Abstand zwischen der Blechkante und der Radiusauslaufinie. Durch geometrische Unterschiede der Fügestelle sowie im Anlagenaufbau hat jedes Fügeverfahren technische Mindestvorgaben, die für eine optimale Fügequalität eingehalten werden müssen.
Fügeabstand:	Der Fügeabstand ist der Abstand zwischen den einzelnen Fügestellen mit direkten Einfluss auf die Verbindungseigenschaften.
Maßhaltigkeit:	Hierbei wird die Einhaltung der Ist-Maße eines Bauteils innerhalb der vereinbarten zulässigen Toleranzen untersucht.
Fügeposition:	Die Fügeposition beschreibt die Lage der zu fügenden Punkte oder Nähte während des Fügens. Je nach Fügetechnologie kann in unterschiedlichen Fügepositionen gefügt werden, welches eine flexiblere Anlagenauslegung ermöglicht.
Festigkeit:	Festigkeit ist eine wichtige Anforderung einer Verbindung, die sich durch den Widerstand definiert, den eine Verbindung aufgrund seiner atomaren Struktur sowie seines Gefüges der Verformung entgegensetzt (Ilschner & Singer, 2010).

Spaltüberbrückungsfähigkeit:	Die Spaltüberbrückungsfähigkeit gibt an, wie wirksam die Fügetechnologie einen Spalt zwischen den Bauteilen überwinden kann. Eine hohe Spaltüberbrückungsfähigkeit vermeidet eine Verletzung der technisch festgelegten Toleranzen.
Dichtheit:	Bei Bereichen an der Karosserie, welche direkt mit Wasser oder Feuchtigkeit in Berührung kommen, wie beispielsweise im Dachbereich, darf es zu keinem Wassereintritt kommen. Undichtheit kann zur Qualitätsminderung des Produktes führen.
Korrosionsbeständigkeit:	Die Zerstörung von Werkstoffen durch Reaktion mit der Umwelt wird als Korrosion bezeichnet. Eine Verringerung der Bauteilfestigkeit kann Folge einer Korrosion sein. Die Korrosionsbeständigkeit zeigt, ob ein Verfahren für Verbindungen im Nass- oder Außenbereich einsetzbar ist.

Qualitative Kriterien

Anmutung:	Die Anmutung beschreibt die Reproduzierbarkeit sowie Optik der Fügung, um einen Einsatz der Fügeverfahren im Sichtbereich zu prüfen.
Störkontur:	Eine Störkontur entsteht bei Verwendung eines Fügeelements oder -drahts. Sie kann zu einer lokalen Überhöhung und somit in eine negative Erscheinung der Fügung oder Verletzungsgefahr führen.
Toleranzempfindlichkeit:	Darunter wird die Sensitivität der Fügetechnik gegenüber einer Abweichung der Wandstärke, des Werkstoffs oder der Oberfläche vom Nennmaß definiert.
Anwendungsspektrum:	Das Kriterium untersucht die Flexibilität der Fügetechnologien hinsichtlich der Materialunabhängigkeit, dem Materialdickenspektrum und der Möglichkeit, ob mehr als zwei Bleche miteinander gefügt werden können.
Fügerichtung:	Die Fügerichtung definiert, welcher Werkstoff beim Fügeprozess zuerst gefügt wird. Die Fügeeteilanzordnung wie beispielsweise „weich auf hart“ hat eine hohe Bedeutung bei der Anlagenauslegung.
Zugänglichkeit:	Für den prozesssicheren Ablauf des Fügeverfahrens hat der Zugang zur Fügestelle eine entscheidende Rolle. Durch die Geometrie der Bauteile bzw. der Vorrichtung kann oftmals keine oder nur eine einseitige Zugänglichkeit zur Fügestelle gewährleistet werden.
Benutzerfreundlichkeit:	Zur Schaffung einer technischen Akzeptanz bei den Mitarbeitern spielt die Benutzerfreundlichkeit eine relevante Rolle. Diese ist abhängig von der Einfachheit der Softwarebedienung.

Nach dem Identifizieren der Einflussfaktoren muss eine Charakterisierung dieser erfolgen. Dabei werden die technologischen Kriterien hinsichtlich ihrer Bauteilabhängigkeit untersucht und folgenden Klassen zugeordnet: globale (G), lokale (L) sowie bindende Anforderungen (E). Bauteilunabhängige Kriterien stellen globale Anforderungen, wie beispielsweise der minimale Fügeabstand dar. Diese Anforderung ist grundsätzlich für alle Bauteile identisch und somit statisch. Dagegen können bauteilabhängige Kriterien lokale Anforderungen stellen, wie beispielsweise die einseitige Zugänglichkeit für bestimmte Bereiche eines Bauteils. Daher variieren die Kriterien entsprechend der Anforderungen einer Fügestelle, weshalb sie ein dynamisches Verhalten aufweisen. Eine Teilmenge der lokalen Anforderungen sind die bindenden Anforderungen. Die bindenden Anforderungen stellen analog zum Screening-Modell Ausschlusskriterien dar, die für den Einsatz einer Füge-technologie zwingend erfüllt werden müssen. Im Fall, dass ein Kriterium nicht erfüllt werden kann, soll jedoch im Gegensatz zu dem Screening-Modell bei den bindenden Anforderungen eine Füge-technologie nicht direkt ausgeschlossen werden. In dem Fall wird in dem später folgenden Potential-Modell geprüft, ob durch eine Anpassung von Werkstoff oder Konstruktion eine Realisierbarkeit der Technologie gewährleistet werden kann (siehe hierzu Abschnitt 4.6). Abbildung 4.29 veranschaulicht die einzelnen Klassen der Einflusskriterien.

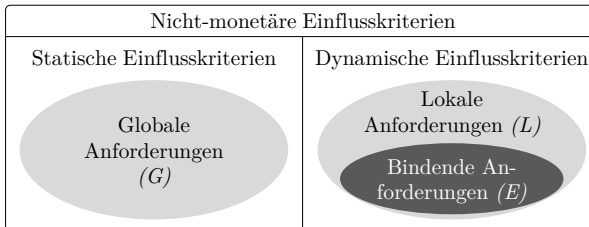


Abbildung 4.29: Klassen der Einflusskriterien

4.4.2 Entwicklung eines Evaluationsmodells

Um eine Evaluation der identifizierten Einflussfaktoren für die jeweiligen Füge-technologien zu ermöglichen, sind drei wesentliche Schritte erforderlich: die eigentliche Evaluation, eine standardisierte Skalierung sowie die Transformation der Ergebnisse. Die einzelnen Schritte werden im folgenden Abschnitt erläutert.

In dem ersten Schritt, der Evaluation, müssen die erforderlichen Daten erfasst werden. Für die Datenerhebung kann als Erhebungsinstrument beispielsweise ein Evaluierungsbogen mit offenen (quantitativen) sowie geschlossenen (qualitativen) Fragen herangezogen werden. Während geschlossene Fragen über definierte Antworten verfügen, existieren bei

offenen Fragen keine vorgegebenen Antwortkategorien (Homburg, 2012). Bei den qualitativen Einflusskriterien erfolgt beispielsweise eine geschlossene Frage, bei der zwischen dichotom-, trichotom- sowie polytomen Antwortkategorien mit zwei, drei oder mehreren Ausprägungen unterschieden werden kann (Porst, 2014). Die Abbildung 4.30 veranschaulicht die unterschiedlichen Beantwortungsmöglichkeiten im Rahmen der Evaluierung.

- Nennen Sie den minimalen Fügeabstand:

19 mm

- Wie hoch ist der Einfluss des Fügeprozesses auf die Maßhaltigkeit des Bauteils?

Sehr hoher Bauteilverzug

○

○

○

○

●

○

○

○

Kein Bauteilverzug

0123456789

- Ist ein Fügen von mehr als 2 Blechen miteinander realisierbar?

Nein
○

Ja
●

Abbildung 4.30: Ausschnitt eines exemplarischen Bewertungsbogens zur Evaluation quantitativer sowie qualitativer Einflussfaktoren

In dem zweiten Schritt des Evaluationsmodells erfolgt die standardisierte Skalierung der einzelnen Einflussfaktoren. Mit den Faktoren werden unterschiedliche Sachverhalte ausgedrückt, die verschiedene Dimensionen besitzen. Für die Erfassung der Antworten ist es daher wichtig, eine Skalierung der Kriterien festzulegen. Dabei kann zwischen vier verschiedenen Skalenklassen unterschieden werden: Nominalskala, Ordinalskala, Intervallskala und Verhältnisskala (Homburg, 2012). Für die Erfassung der qualitativen dichotom- und trichotomen Kriterien findet die Nominalskala Verwendung. Die Bewertung erfolgt durch linguistische Ausdrücke im Sinne von „Ja“, „Nein“ und bei Bedarf durch die Benennung einer Zwischenstufe. Weder die Bildung einer Reihenfolge, noch die Durchführung einer Berechnung ist bei einer Nominalskala möglich (Backhaus, Erichson, Plinke & Weiber, 2018).

Die quantitativen Kriterien werden mit einer Verhältnisskala ausgedrückt. Diese ist metrisch skaliert und besitzt einen absoluten Nullpunkt. Absolute Nullpunkte sind nicht vom Menschen beeinflussbar. Somit sind nicht nur die Abstände, sondern auch die Verhältnisse interpretierbar. Die qualitativen polytomen Kriterien werden mit einem Bereich von null bis neun Skalenpunkten intervallskaliert. Die Skalenpunkte besitzen die gleichen Abstände zueinander, ein absoluter Nullpunkt existiert aber nicht. Daher ist keine Multiplikation oder Division möglich. Die Berechnung des arithmetischen Mittels ist jedoch erlaubt. Bei weniger als neun Skalenpunkten wird das Ergebnis ungenau, da die Antworten nicht ausreichend differenziert werden können. Bei mehr Skalenpunkten

kann es laut Miller (1956) zu einer Überforderung der Teilnehmer kommen. Außerdem handelt es sich bei den qualitativen polytomen Kriterien um eine endpunktbenannte Skala, die auch als Likert-Skalierung bekannt ist (Homburg, 2012). Die beiden Endpunkte (Skalenpunkt null und neun) sind durch linguistische Ausdrücke wie beispielsweise „sehr geringe Fähigkeit“ und „sehr hohe Fähigkeit“ gekennzeichnet. Nach Porst (2014) ist eine endpunktbenannte Skala vorteilhaft, da sie eine Intervallskalierung darstellt. Somit ist es auch möglich, ein arithmetisches Mittel bei der Auswertung zu berechnen. Weiterhin fällt die Verbalisierung der Skalenpunkte weg. Außerdem wurde bei den qualitativen polytomen Kriterien bewusst eine gerade Anzahl an Skalenpunkten gewählt, da es somit keine Skalenpunktmittel gibt. Die Mitte wird oft als eine Fluchtkategorie verwendet, wenn ein Teilnehmer keine Entscheidung treffen will (Porst, 2014).

In dem letzten Schritt des Evaluationsmodells erfolgt die Transformation der erfassten Daten, in der die unterschiedlich skalierten Kriterienausprägungen durch sogenannte Transformationsfunktionen vereinheitlicht werden. Die Transformation ist für den Schritt der Datenauswertung und der Vergleichbarkeit der Kriterien (c) unumgänglich. Die Codierung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit zwischen dem minimalen (SP^{min}) bzw. maximalen (SP^{max}) Skalenwert null bis neun. Je nach Einflusskriterium werden unterschiedliche Transformationsfunktionen eingesetzt (Breiung & Knosala, 1997).

Die quantitativen Kriterien besitzen zwei unterschiedliche Transformationsfunktionen. Typ 1 stellt eine linear fallende Präferenzfunktion beziehungsweise Transformationsfunktion dar. Dieser Typ findet bei Einflusskriterien Verwendung (z. B. Flanschbreite), die minimiert werden sollen. Umso kleiner die Maßzahl v_c , desto besser schneidet die Fügetechnologie bei diesem Kriterium ab. Die Maßzahl entspricht der angegebenen Antwort bei den quantitativen Kriterien. Typ 2 ist die linear steigende Präferenzfunktion. Große Maßzahlen erhalten einen größeren Punktwert. Der Effekt trifft auf Einflusskriterien zu, die maximiert werden sollen (z. B. Festigkeit). Das Minimum v_c^{min} ist der schlechteste Wert, den eine Fügetechnologie bei dem jeweiligen Einflusskriterium annehmen kann. Das Optimum v_c^{max} ist dagegen der maximale Wert, den eine Fügetechnologie annehmen kann. Für das Aufstellen der linearen Funktion wird als erstes mit der Gleichung (4.38) die Steigung M berechnet. Die Transformationsfunktionen für die quantitativen Kriterien sind in Abbildung 4.31 veranschaulicht.

$$M_c = \frac{v_c^{min} - v_c^{max}}{SP^{min} - SP^{max}} \quad \forall c \in C \quad (4.38)$$

Die Transformation der evaluierten Charakteristik v_c einer Fügetechnologie (j) in normalisierte Skalierungspunkte (x_c) kann anschließend mit Gleichung (4.39) vorgenommen werden. Während die erste Formel für linear fallende Funktionen herangezogen wird, berechnet die zweite Formel die Skalierungspunkte für linear steigende Funktionen.

$$x_{cj} = \frac{v_{cj} - v_c^{min}}{M_c} \quad \vee \quad x_{cj} = \frac{v_c^{max} - v_{cj}}{M_c} \quad \forall c \in C, j \in J \quad (4.39)$$

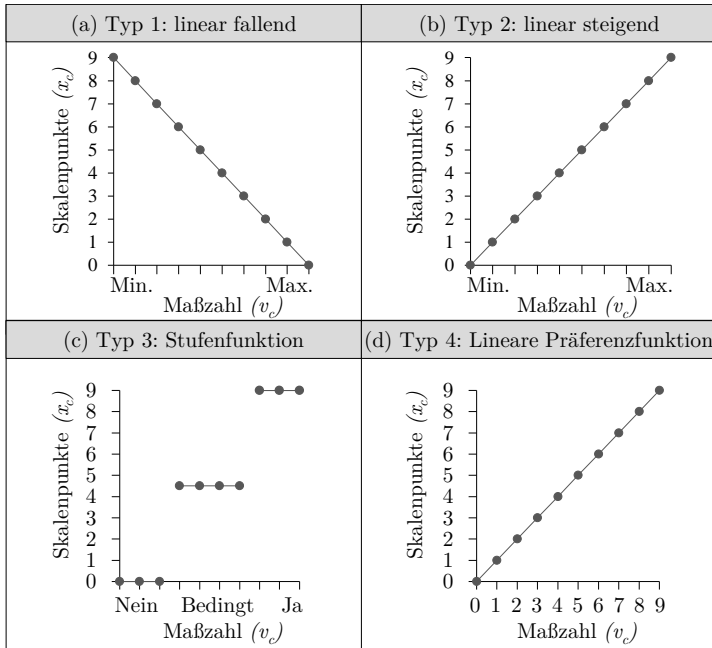


Abbildung 4.31: Darstellung der Transformationsfunktionen für quantitative (a-b) und qualitative (c-d) Kriterien

Bei den qualitativen Kriterien existieren auch zwei Transformationsfunktionen. Den linguistischen Ausdrücken mit maximal drei Kriterienausprägungen werden entsprechend Typ 3 die Skalenpunkte null und neun (dichotomen) bzw. null, vier und neun (trichotomen) zugeordnet. Die dicho-/trichotomen Kriterien bilden dadurch eine Stufenfunktion. Typ 4 beschreibt die lineare Präferenz der polytomen Kriterien. Sie werden dagegen direkt bei der Beantwortung durch Zuordnung zu einem Punktwert codiert. Eine Transformation ist durch die direkte Punktbewertung somit überflüssig. Die Transformationsfunktionen der qualitativen Kriterien werden in Abbildung 4.31 dargestellt.

4.4.3 Entwicklung eines Gewichtungsmodells

Um den einzelnen Einflussfaktoren eine realitätsnahe Priorität zuzuordnen, wird ein Gewichtungsmodell integriert. Im Gegensatz zu dem Evaluationsmodell ist das Gewichtungsmodell nicht technologiespezifisch und basiert auf dem im Kapitel 2.2.4 vorgestellten paarweisen Vergleich. Dabei werden alle Kriterien vertikal und horizontal in einer Matrix aufgelistet, um das Kriterium (q) mit dem Kriterium (p) zu vergleichen.

Tabelle 4.11: Ausschnitt des paarweisen Vergleichs

$\begin{matrix} q \\ p \end{matrix}$	1	2	3	Häufigkeit (f)
1	-	A_{12}	A_{13}	$\sum_{q=1}^n A_{1q}$
2	A_{21}	-	A_{23}	$\sum_{q=1}^n A_{2q}$
3	A_{31}	A_{32}	-	$\sum_{q=1}^n A_{3q}$

Tabelle 4.11 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt eines paarweisen Vergleichs. Im Fall, dass das Kriterium (p) wichtiger als das Kriterium (q) ist, wird das Feld A_{pq} mit einer eins befüllt. Im Fall, dass das Kriterium unwichtiger ist, wird das Feld mit einer null befüllt. Bei einer äquivalenten Präferenz erhält das Feld eine Gleichgewichtung. Im Umkehrschluss ergibt sich daraus der in Gleichung (4.40) erläuterte Wert für das Feld A_{pq} . Breiung und Knosala (1997) beschreiben das Ergebnis als paarweise normierte Bewertungsgröße. Daher wird die Matrix nur in den Zellen oberhalb der Diagonalen ausgefüllt. Die Diagonale ist der Vergleich jedes Kriteriums mit sich selbst. Da dieser Vergleich nicht möglich ist, weisen die in Gleichung (4.41) beschriebenen Zellen eine leere Menge auf.

$$A_{qp} = 1 - A_{pq} \quad \forall p \neq q \quad (4.40)$$

$$A_{pp} = \emptyset \quad \forall p = q \quad (4.41)$$

Um die Transitivität zu überprüfen und Fehler sowie Aufwand für den paarweisen Vergleich zu minimieren, wurde eine Konsistenzprüfung integriert. Die besagt, dass eine binäre Relation R über eine Menge O transitiv ist, wenn das Kriterium a einen Bezug zu b hat, und b wiederum einen Bezug zu c . Demgemäß besteht nach Gleichung (4.42) eine Beziehung zwischen Kriterium a und c (Fodor & Roubens, 1994).

$$aRb \wedge bRc \implies aRc \quad \forall a, b, c \in O \quad (4.42)$$

Um die Häufigkeiten f der einzelnen Kriterien für die Gewichtung zu ermitteln, werden die Matrixfelder in einer Zeile addiert. Zur Kontrolle der Richtigkeit jeder paarweisen Vergleichsmatrix muss die Summe der Kriterienhäufigkeiten der Prüfsumme P nach der Gaußschen Summenformel in Gleichung (4.43) entsprechen (Hayes, 2006). Bei einer Anzahl von drei Kriterien (n^c) ergibt sich beispielsweise eine Prüfsumme von drei.

$$P = \frac{n^c \cdot (n^c - 1)}{2} \quad (4.43)$$

Durch das Aufsummieren der Häufigkeiten f einer Zeile kann die Rangfolge (r_c) bestimmt werden. Beispielsweise bekommt das Kriterium mit der höchsten Häufigkeit den Rang eins, das mit der zweithöchsten Häufigkeit den Rang zwei. Bei der Bildung der Rangfolge

wird jedoch die Häufigkeitsdifferenz nicht berücksichtigt. Daher würde eine Berechnung der Gewichtungsfaktoren mit der ordinalen Rangfolge kein genaues Ergebnis erzielen. Um den Nachteil einer fehlenden Beachtung der Rangabstände untereinander zu minimieren und eine realistische Gewichtung zu ermöglichen, wird bei der Gewichtung eine Korrektur durch eine abgewandelte Form der SIMOS Methode durchgeführt. Dabei wird abhängig von der Differenz der Kriterien mit der maximalen (f_{max}) und minimalen (f_{min}) Häufigkeit und der Ranganzahl (a_c) eine unterschiedliche Anzahl an fiktiven Rängen hinzugefügt. Somit ändert sich die Rangnummer der Kriterien. Die Häufigkeitsdifferenzen werden dabei unterschiedlichen Klassen (c^h) zugeordnet. Die Klasse gibt an, wie viele fiktive Ränge eingesetzt werden. Die Berechnung der Anzahl an Klassen wird in Gleichung (4.44) aufgezeigt.

$$c^h = \frac{f_{max} - f_{min}}{a_c} \quad (4.44)$$

Mit der Ermittlung der Klassengröße kann durch Hinzufügen der fiktiven Ränge die neue Rangfolge r'_c berechnet werden. Für jede höhere Klasse wird dabei ein fiktiver Rang zusätzlich eingebaut. Gleichung (4.45) zeigt die Berechnung der neuen Ränge für die einzelnen Kriterien auf.

$$r'_c = \begin{cases} 1, & (f_{a_{c-1}} - f_{a_c}) < 0 \\ r'_{c-1} + \left\lceil \frac{f_{a_{c-1}} - f_{a_c}}{c^h} \right\rceil, & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall c \in C \quad (4.45)$$

Mit der neuen Rangfolge kann die angepasste Ranganzahl a'_c und der normierte Gewichtungsfaktor w_c bestimmt werden. Für die Berechnung des Gewichtungsfaktors in Gleichung (4.46) wird die summierende Ranglistenmethode angewendet (Stillwell, Seaver & Edwards, 1981).

$$w_c = \frac{(a'_c - r'_c + 1)}{\sum_{c=1}^C (a'_c - r'_c + 1)} \quad \forall c \in C \quad (4.46)$$

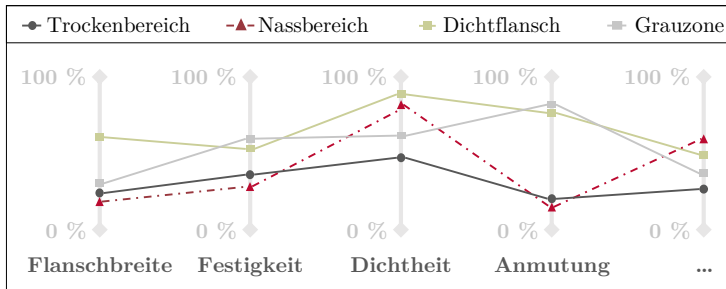


Abbildung 4.32: Ergebnisse des paarweisen Vergleichs zur Ermittlung von Gewichtungsfaktoren für verschiedene Fahrzeugbereiche

Die ermittelten Gewichtungsfaktoren repräsentieren die Präferenzen eines Entscheidungsträgers bei der Auslegung der Fügetechnik für die technologischen Kriterien. Um eine noch detailliertere Gewichtung vorzunehmen, kann eine Gewichtung für die einzelnen Fahrzeugbereiche durchgeführt werden (Choudry, Haass, Alber & Landgrebe, 2018). Abbildung 4.32 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt der Ergebnisse eines paarweisen Vergleichs, der für verschiedene Fahrzeugbereiche durchgeführt wurde.

4.4.4 Berechnung der technologischen Bewertungskennzahl

Die technologische Bewertung benötigt analog zur ökonomischen und ökologischen Bewertung projekt- sowie prozessspezifische Daten. Aufgrund der diskutierten Problematik hinsichtlich unzureichender Datenverfügbarkeit in der frühen Produktentstehungsphase erfolgt die technologische Bewertung mit der statischen, semi-dynamischen und dynamischen Bewertung dreistufig. In der statischen Bewertung ist die Datenverfügbarkeit sehr begrenzt. Daher werden in dieser Phase keine spezifischen Produkthanforderungen berücksichtigt. Um die Ergebnisse der technologischen Evaluation (x_{cj}) und Gewichtung (w_c) in eine Kennzahl zusammenzuführen, werden in Gleichung (4.47) die gewichteten Evaluationsergebnisse der einzelnen Einflussfaktoren als Gesamtwert für die jeweilige Fügetechnologie (GW_j) aufsummiert.

$$GW_j = \sum_{c=1}^C x_{cj} \cdot w_c \quad \forall j \in J \quad (4.47)$$

Zur Bildung einer Verhältniskennzahl wird als Bezugsgröße der maximale Gesamtwert (GW_{max}) angenommen. Daher wird durch eine maximale Bewertung (x_{max}) eine ideale Fügetechnologie als Referenz für die Berechnung der Bewertungskennzahl angenommen. Die Ermittlung des (GW_{max}) wird in Gleichung (4.48) beschrieben.

$$GW_{max} = \sum_{c=1}^C x_{max} \cdot w_c \quad (4.48)$$

Mit der Ermittlung des Gesamtwerts einer Fügetechnologie sowie der Ideallösung wird für die technologische Bewertung von Fügetechnologien der Nutzwert-Index (NI_j) mit einem Lösungsbereich zwischen null und eins entwickelt. Das Optimum der Bewertung liegt bei eins. Die Berechnung des NI_j wird in Gleichung (4.49) beschrieben.

$$NI_j = \frac{GW_j}{GW_{max}} \quad \forall j \in J \quad (4.49)$$

Der Nutzwert-Index ist in der Formulierung unabhängig von dem zu fügenden Bauteil, daher weist er ein statisches Verhalten auf. In der semi-dynamischen Bewertung, in

der die erforderlichen Daten bereits als eine erste Näherung in Intervallbereichen zur Verfügung stehen, sowie in der dynamischen Bewertungsstufe, in der Daten bezüglich des zu fügenden Bauteils vollständig vorliegen, wird durch Berücksichtigung der Bauteilanforderungen eine präzisere Bewertung ermöglicht. Um die dynamischen Anforderungen (r_c) im NI zu berücksichtigen, ist jedoch eine Erweiterung der Bewertungskennzahl erforderlich. Der Aufbau der (semi-)dynamischen Bewertung kann dabei mit drei Funktionen beschrieben werden: der Belohnungs-, Straf- und Ausschlussfunktion.

Die Belohnungsfunktion $R(r_c, x_{cj})$ gleicht die evaluierte Charakteristik (x_c) mit der lokalen Anforderung (r_c) ab. Die Anforderungen können, analog zu der Evaluierung, einen Skalenwert zwischen null und neun annehmen. Im Fall, dass das Kriterium einer Technologie die Anforderung erfüllt, wird die Alternative durch das Anpassen des Punktwerts auf den maximalen Wert (x_{max}) belohnt und für das Kriterium als ideale Lösung betrachtet. Die Belohnungsfunktion wird in Gleichung (4.50) beschrieben.

$$R(r_c, x_{cj}) = \begin{cases} x_{max}, & r_c \leq x_{cj} \\ x_{cj}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.50)$$

Die Straffunktion $P(r_c, x_{cj})$ in Gleichung (4.51) gleicht analog zur Belohnungsfunktion die evaluierten Kriterien mit den lokalen Anforderungen ab. Im Fall, dass das Kriterium einer Füge-technologie die Anforderung nicht erfüllt, wird die Technologie bestraft. Die Bestrafung ist dabei abhängig von der Differenz zwischen der Anforderung und der Charakteristik. Die Bestrafung kann als Zeitaufwand betrachtet werden, der für eine konstruktive Änderung des Bauteils (z. B. Vergrößerung des Flanschs) benötigt wird, um das Bauteil an eine Füge-technologie anzupassen.

$$P(r_c, x_{cj}) = \max(0, r_c - x_{cj}) \quad (4.51)$$

Die Ausschlussfunktion $\theta(r_c, x_{cj})$ in Gleichung (4.52) dient als Einheitssprungfunktion. Dabei werden die Kriterien hinsichtlich der Erfüllung der bindenden Anforderungen untersucht. Im Fall, dass ein bindendes Kriterium nicht erfüllt werden kann, schaltet die Funktion von eins auf null um. Das wiederum indiziert, dass die Füge-technologie ohne weitere werkstoff- oder konstruktionsorientierte Anpassungen für die untersuchte Füge-stelle keine technologische Realisierbarkeit gewährleistet. Auch im Fall, dass aufgrund der Straffunktion die Gesamtbewertung einen negativen Wert aufweist, schaltet der NI aufgrund des zu hohen Anpassungsbedarfs auf null um.

$$\theta(r_c, x_{cj}) = \begin{cases} 0, & \sum_{c \in E} \max(0, r_c - x_{cj}) \neq 0 \quad \vee \\ & \sum_{c \in G} (x_{cj} \cdot w_c) + \sum_{c \in L} w_c (R(r_c, x_{cj}) - P(r_c, x_{cj})) \leq 0 \\ 1, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.52)$$

Mit der Belohnungs-, Straf- sowie Ausschlussfunktion kann der Nutzwert-Index in Gleichung (4.53) erweitert werden, um eine dynamische Bewertung von Technologien hinsichtlich technologischer Kriterien durchzuführen. Der Lösungsbereich des NI ist weiterhin zwischen null und eins und das Optimum der Bewertung liegt bei eins.

$$NI_j = \left(\frac{\sum_{c \in G} (x_{cj} \cdot w_c) + \sum_{c \in L} w_c (R(r_c, x_{cj}) - P(r_c, x_{cj}))}{GW_{max}} \right) \cdot \theta(r_c, x_{cj}) \quad (4.53)$$

Das Verhalten der statischen und dynamischen Bewertung wird durch das Variieren der Charakteristika in Abbildung 4.33 anhand eines vereinfachten Beispiels veranschaulicht. Während (a) die Effekte der Belohnungs- und Straffunktion für eine lokale Anforderung ($r_{c \in L} = 5$) aufzeigt, wird in (b) das Verhalten der Ausschlussfunktion für eine bindende Anforderung ($r_{c \in E} = 5$) beschrieben.

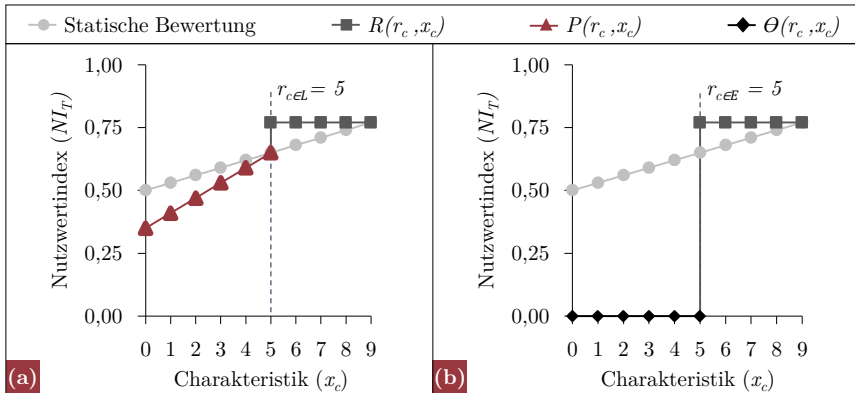


Abbildung 4.33: Effekt der Belohnungs- und Straffunktion (a) sowie der Ausschlussfunktion (b) im Vergleich zur statischen Bewertung

Beide Graphen zeigen das lineare Verhalten der statischen Bewertung, bei der weder die lokale noch die bindende Anforderung einen Einfluss auf die Gesamtbewertung hat. Bei der dynamischen Bewertung in (a) hingegen findet abhängig von dem Erfüllen einer Anforderung eine Belohnung bzw. Bestrafung statt. Bei einer bindenden Anforderung, wie in (b) exemplarisch dargestellt, wird der Effekt der Einheitssprungfunktion aufgezeigt. Diese behält für die Gesamtbewertung bis zu dem Zeitpunkt den Wert null bei, solange eine bindende Anforderung nicht erfüllt werden kann. Sobald keine Verletzung der Anforderung vorliegt, greift die Belohnungsfunktion.

4.5 Ermittlung der ganzheitlich optimalen Handlungsempfehlung

Die dritte Komponente der Auswahlmethodik bildet das Optimierungsmodell zur Ermittlung der optimalen Handlungsempfehlung. Hierzu erfolgt zuerst eine Zusammenführung der ökonomischen, ökologischen und technologischen Dimension in eine Bewertungskennzahl. Bisher erfolgt die Bewertung auf Fügepunkt-Ebene. Um eine ganzheitlich optimale Lösung zu erhalten, ist eine Bewertung auf Baugruppenebene erforderlich. Mit der multidimensionalen Kennzahl folgt daher anschließend die mathematische Formulierung eines Optimierungs-Modells mit Beschreibung der Zielfunktionen sowie der dazugehörigen Nebenbedingungen.

4.5.1 Zusammenführung der Bewertungsdimensionen

Im Rahmen des Bewertungs-Modells wurde mit KI , SI und NI für die drei Dimensionen *Ökonomie*, *Ökologie* und *Technologie* jeweils eine Kennzahl entwickelt. Während mit der ökonomischen Bewertung die monetäre Wertigkeit (M) einer Füge-technologie aufgezeigt werden kann, umfasst die nicht-monetäre Bewertung (N) die ökologische und technologische Bewertung. Um die optimale Technologie zu identifizieren, müssen die Kennzahlen konsolidiert werden. Die Tatsache, dass in der Praxis die Bedeutung monetärer und nicht monetärer Faktoren aufgrund unternehmensspezifischer Ziele nicht gleichwertig ist, erfordert für die einzelnen Dimensionen Präferenzkoeffizienten. Daher sind die Koeffizienten p^{KI} , p^{SI} und p^{NI} in die Berechnung integriert, um die strategische Bedeutung der Dimensionen zu berücksichtigen. Die Summe der Präferenzkoeffizienten muss, wie in Gleichung (4.54) beschrieben, immer eins sein.

$$p^{KI} + p^{SI} + p^{NI} = 1 \quad (4.54)$$

Die Ergebnisse der monetären und nicht-monetären Bewertung werden in Gleichung (4.55) und (4.56) mit den Präferenzkoeffizienten verrechnet und innerhalb des strategischen Leistungs-Indikators (sLI) in Gleichung (4.57) konsolidiert. Der sLI beschreibt, inwieweit die Auswahl von Technologie j für den Punkt i den Anforderungen entspricht. Nimmt der Index den Wert eins an, so ist die optimale Lösung gefunden, wohingegen null die schlechteste Lösung darstellt. Im Fall, dass die Kennzahl den Wert null annehmen sollte, ist eine Realisierbarkeit der Technologie j zum Fügen von Fügepunkt i in der Form nicht möglich.

$$M_{ij} = KI_{ij} \cdot p^{KI} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.55)$$

$$N_{ij} = SI_{ij} \cdot p^{SI} + NI_{ij} \cdot p^{NI} \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.56)$$

$$sLI_{ij} = (M_{ij} + N_{ij}) \cdot [KI_{ij} \cdot SI_{ij} \cdot NI_{ij}] \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.57)$$

Zur Entscheidungsunterstützung ist eine grafische Darstellung der Ergebnisse vorteilhaft. Die Visualisierung kann über ein zwei- oder dreidimensionales Bewertungsportfolio erfolgen. Im Rahmen der Arbeit wurde aufgrund der übersichtlicheren Entscheidungsunterstützung das zweidimensionale Bewertungsportfolio herangezogen. Das jeweilige Optimum der Bewertung liegt in den Koordinaten (1, 1). Je näher eine Technologie am Optimum liegt, desto besser ist die Bewertung (siehe Abbildung 4.34).

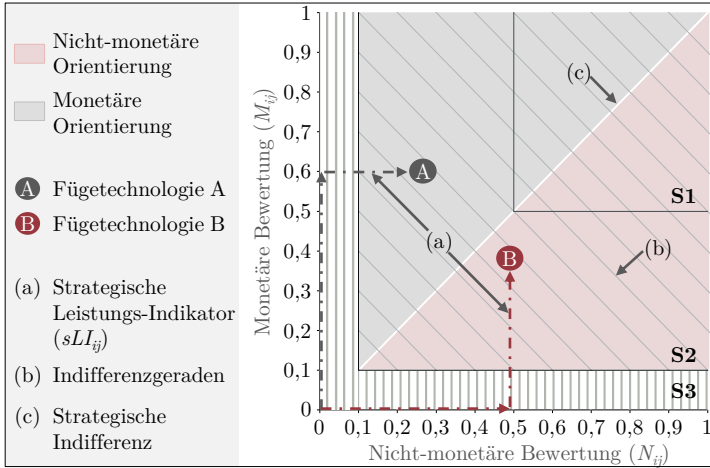


Abbildung 4.34: Zweidimensionales Bewertungsportfolio für Fügetechnologien in Anlehnung an Choudry, Kaspar, Alber und Landgrebe (2018)

Grundsätzlich ist das Verhältnis des monetären und nicht-monetären Einflusses eine strategische Unternehmensentscheidung und somit individuell anpassbar. Für das folgende Bewertungsportfolio wurde zur Vereinfachung mit $p^{KI} = 0,5$ und $p^{SI} + p^{NI} = 0,5$ das Verhältnis 1:1 definiert. Die strategische Indifferenzgerade hat dementsprechend eine proportionale Steigung. Des Weiteren kann das Portfolio in drei Bereiche untergliedert werden. Technologien, welche sich im Bereich S1 befinden, versprechen eine hohe Gesamtwertigkeit. Technologien, welche im Bereich S2 positioniert sind, weisen eine durchschnittliche Wertigkeit auf. Technologien im Bereich S3 weisen entweder aufgrund der Verletzung von Kernprämissen im Rahmen der Ausschlussfunktion ohne werkstoff- oder konstruktionsorientierte Anpassungen keine technologische Realisierbarkeit oder eine sehr geringe monetäre Wertigkeit auf. In dem vorliegenden Portfolio zeichnet sich beispielsweise die Fügetechnologie A durch eine höhere monetäre Wertigkeit aus als Fügetechnologie B. Im Gegensatz dazu verspricht Technologie B einen höheren nicht-monetären Wert. Gesamtheitlich betrachtet befinden sich beide Technologien auf der Indifferenzgerade, sodass der sLI für beide Technologien identisch ist.

4.5.2 Formulierung des Optimierungsprogramms

Mit dem sLI_{ij} wird ein Fügepunkt i einer Fügetechnologie j bewertet. Ziel ist jedoch die Bewertung einer aus mehreren Fügepunkten bestehenden Baugruppe, um eine ganzheitlich optimale Lösung zu ermitteln. Daher wird nicht, wie bisher, für den einzelnen Fügepunkt ein technologiespezifischer sLI_{ij} berechnet, sondern ein sLI für die gesamte Baugruppe, welcher sich in Gleichung (4.58) aus den Summen der monetären Kennzahl M_{ij} und der nicht-monetären Kennzahl N_{ij} im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Fügepunkte (δ^b) zusammensetzt. Der sLI fasst somit die Bewertung der gewählten Zuordnung aller Fügepunkte zu den gewählten Fügetechnologien zusammen.

$$sLI = \frac{1}{\delta^b} \cdot \left(\sum_{i=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{\beta} x_{ij} \cdot (M_{ij} + N_{ij}) \right) \quad (4.58)$$

Dabei weist die monetäre Bewertung (M_{ij}) aufgrund der auslastungsabhängigen Entstehungskosten ein dynamisches Verhalten auf. Das dynamische Kostenverhalten ist auf den Effekt der Sprungfixkosten zurückzuführen (Moser, 1986). Jedes System besitzt eine technologiespezifische Kapazität, in der sie innerhalb einer definierten Zykluszeit eine bestimmte Anzahl an Fügepunkten setzen kann. In Abbildung 4.35 hat die Technologie A beispielsweise eine Kapazität von acht Fügepunkten. Technologie B hingegen kann in der Zykluszeit insgesamt zehn Fügepunkte pro System setzen. Im Fall, dass jeweils neun Punkte mit Technologie A und Technologie B gefügt werden, besteht durch das Verschieben eines Fügepunkts von Technologie A zur Technologie B hohes Einsparpotential, da durch die Verschiebung die Kosten eines Systems eingespart werden könnten.

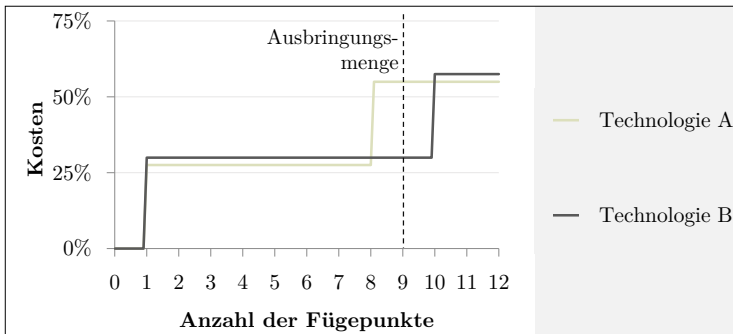


Abbildung 4.35: Effekt der Sprungfixkosten

Das dynamische Kostenverhalten wiederum führt zu einer steigenden Komplexität bei der Ermittlung der optimalen Handlungsempfehlung. Um eine effiziente Lösungsfindung

zu ermöglichen, wird daher ein Optimierungs-Modell entwickelt. Die Beschreibung des vorliegenden Optimierungsproblems kann dabei mit einem Integer-Problem (IP) erfolgen. Bei dieser Art von Problemen sind sämtliche Entscheidungsvariablen ganzzahliger Natur (Taha & Schmidt, 1975). Da weder binäre Zuordnungsvariablen von Fügepunkten zu Fügetechnologien noch die Anzahl der Fügesysteme Werte annehmen können, die nicht den natürlichen Zahlen zuzuordnen sind, wird durch ein IP die Ganzzahligkeitsbedingung sichergestellt. Die Lösung solcher Probleme ist mit gängiger Software wie beispielsweise Gurobi möglich, die auch im Rahmen dieser Arbeit Einsatz gefunden hat.

Die Optimierung des vorliegenden Problems basiert auf zwei Schritten. Der vereinfachte Ablauf ist in Abbildung 4.36 ersichtlich. Im ersten Schritt wird ausschließlich die ökonomische Dimension betrachtet. Die Lösung dieses Schrittes ermittelt die kostenoptimale Zuordnung von Fügepunkten zu Fügetechnologien sowie die daraus resultierenden Kosten CB_{min} , die theoretisch realisierbar wären. Bereits hier findet ein Abgleich mit dem Screening-Modell statt, um technologisch nicht realisierbare Fügetechnologien auszuschließen. Weiterhin müssen homogene Gruppen gleichartiger Fügepunkte hinsichtlich eines bestimmten Merkmals definiert werden. Hierzu werden Fügepunkt-Wolken gebildet, welche Fügepunkte zuordnen, die in gleichen Zyklen und demselben Anlagenbereich gesetzt werden können.

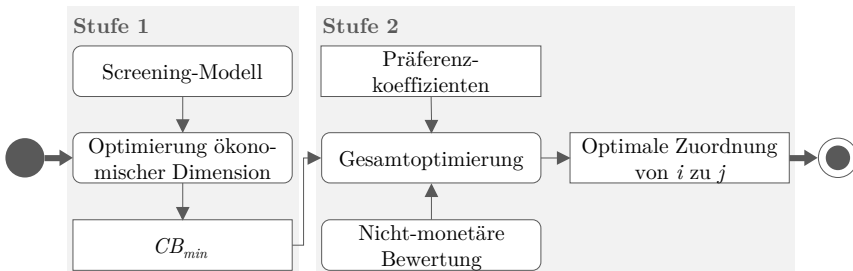


Abbildung 4.36: Ablauf der Optimierung

Abbildung 4.37 zeigt eine exemplarische Baugruppe und die dazugehörigen Reichweiten der verschiedenen Fügesysteme. Dabei stehen die einzelnen farblich dargestellten Kreise für eine eigene Fügepunkt-Wolke. Als Eingangsinformationen werden unter anderem die Prozess- und Projektdaten einschließlich der Zuordnung der Fügepunkt-Wolken des Untersuchungsobjekts benötigt.

Das Ergebnis des ersten Schrittes dient als Eingangsgröße für den zweiten Schritt. Dieser umfasst zusätzlich die nicht-monetäre Bewertung zur Ermittlung des Index N_{ij} der einzelnen Fügepunkte i , falls diese mit Technologie j gefügt werden. Durch die Präferenzkoeffizienten der einzelnen Dimensionen kann anschließend die optimale Lösung ermittelt werden.

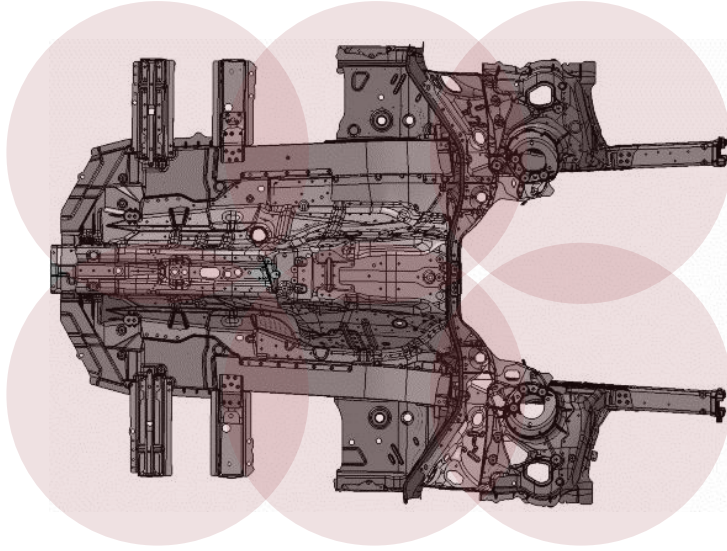


Abbildung 4.37: Darstellung von Fügapunkt-Wolken in einer Baugruppe

Für die Modellformulierung werden die in Tabelle 4.12 erläuterten Notationen herangezogen. Der erste Abschnitt der Tabelle zeigt die verwendeten Mengen und Indices auf. Anschließend werden die binären Variablen vorgestellt, welche als Eingangsgröße benötigt und somit dem Optimierungsmodell vorgegeben werden. Zuletzt werden die binären Entscheidungsvariablen eingeführt, welche basierend auf der Zielfunktion und der Nebenbedingungen im Optimierungs-Modell ermittelt werden.

Gleichung (4.59) entspricht der Zielfunktion des ersten Schrittes. Der erste Teil der Zielfunktion bezieht sich auf die Entstehungskosten für die anzuschaffenden Systeme E_l der Fügetechnologie-Gruppen l sowie die Kosten für die Vorrichtung G_m der Stationen m . Der zweite Teil der Zielfunktion berücksichtigt die variablen Kosten V_j . Dabei nimmt die binäre Entscheidungsvariable x_{ijk} den Wert eins an, falls Fügapunkt i aus Fügapunkt-Wolke k mit Technologie j gefügt wird. Die variablen Kosten sind weiterhin abhängig von der jährlichen Ausbringungsmenge der produzierten Fahrzeuge F des betrachteten Typs, die über die Laufzeit T mit dem Kalkulationszinssatz r abgezinst werden, um mit der Kapitalwertmethodik den Zeitpunkt der Kostenentstehung zu berücksichtigen. Der resultierende Zielfunktionswert wird im Folgenden als CB_{min} bezeichnet.

$$\min \sum_{l=1}^{\delta} E_l + \sum_{m=1}^{\varepsilon} G_m + \sum_{t=0}^T \frac{\sum_{i=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{\beta} \sum_{k=1}^{\gamma} x_{ijk} \cdot V_j}{(1+r)^t} \cdot F \quad (4.59)$$

Tabelle 4.12: Optimierungs-Modell: Notation verwendeter Variablen

$i \in I = \{1; \dots; \alpha\}$	Fügepunkte
$j \in J = \{1; \dots; \beta\}$	Fügetechnologien
$J^\varphi \subseteq J$	Linienförmige Fügetechnologien
$k \in K = \{1; \dots; \gamma\}$	Fügepunkt-Wolken
$l \in L = \{1; \dots; \delta\}$	Fügetechnologie-Gruppen
$m \in M = \{1; \dots; \varepsilon\}$	Station
b_{ik}	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn FP } i \text{ zu Wolke } k \text{ gehört} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
d_{ij}	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn FP } i \text{ mit FT } j \text{ realisierbar} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
e_{km}	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn Wolke } k \text{ der Station } m \text{ angehört} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
q_{jl}	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn FT } j \text{ der FT-Gruppe } l \text{ angehört} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
s_m	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn Station } m \text{ aktiv ist} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
s_m^φ	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn in Station } m \text{ linienförmige FT aktiv} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
w_{jk}	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn Wolke } k \text{ mit Technologie } j \text{ gefügt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$
x_{ijk}	$= \begin{cases} 1, & \text{wenn FP } i \text{ mit FT } j \text{ in Wolke } k \text{ gefügt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

Die Berechnung der Entstehungskosten E_l ist der Gleichung (4.60) zu entnehmen. Dabei kommen die im Kapitel 4.2 aufgezeigten Skalierungs- und Degressionseffekte ab dem zweiten Fügesystem zum Tragen. Das hat zur Folge, dass bei Erweiterung einer Station um ein weiteres Fügesystem geringere Kosten anfallen im Vergleich zum Aufbau einer neuen Anlage, da hierbei beispielsweise keine vollständige Anschaffung der Vorrichtungs- oder Schutztechnik erforderlich ist (Choudry, Sandmann & Landgrebe, 2018).

$$E_l = z_l \cdot f_l + (A_l - z_l) \cdot f_l \cdot (1 - \lambda) \quad \forall l \in L \quad (4.60)$$

Ausschließlich für das erste von κ Systemen einer Technologie innerhalb einer Station muss der volle Preis f_l gezahlt werden, für die restlichen Systeme fällt mit dem Einsparfaktor

λ ein reduzierter Preis an. In Gleichung (4.61) und (4.62) wird ermittelt, für wie viele Systeme z_l der Technologie-Gruppe l der vollständige Preis anfällt und für welche Anzahl an Systemen dementsprechend der reduzierte Preis angesetzt wird.

$$z_l \geq \frac{A_l - 1}{\kappa} + \mu^G \quad \forall l \in L \quad (4.61)$$

$$0 < \mu^G < \frac{1}{\kappa} \quad (4.62)$$

Für jede Station m , die sich aus mehreren Fügepunkt-Wolken k zusammensetzt, sind Vorrichtungen wie z. B. eine Einspanntechnik notwendig. Grundsätzlich ist die Vorrichtungstechnik abhängig davon, ob punkt- oder linienförmige Technologien in der Station zum Einsatz kommen. Aufgrund der komplexeren Einspanntechnik fallen bei linienförmigen Technologien die Vorrichtungskosten grundsätzlich höher aus. Mit der Entscheidungsvariable s_m in Gleichung (4.63) kann die Anzahl der aktiven Stationen m ermittelt werden. Mit der binären Eingangsvariable e_{km} findet die Zuordnung der FP-Wolken k und der Stationen m statt. Die Ermittlung der zusätzlichen Vorrichtungskosten für linienförmige Verfahren erfolgt mit der Entscheidungsvariable s_m^φ in Gleichung (4.64). In Gleichung (4.65) werden die dadurch entstehenden Vorrichtungskosten zusammengefasst, wobei K^p die Kosten für eine Vorrichtung für punktförmige und K^φ die Zusatzkosten für eine linienförmige Technologie darstellt.

$$x_{ijk} \cdot e_{km} \leq s_m \quad \forall i \in I; j \in J; k \in K; m \in M \quad (4.63)$$

$$x_{ijk} \cdot e_{km} \leq s_m^\varphi \quad \forall i \in I; j \in J^\varphi; k \in K; m \in M \quad (4.64)$$

$$G_m = s_m \cdot K^p + s_m^\varphi \cdot K^\varphi \quad \forall m \in M \quad (4.65)$$

Die Anzahl der benötigten Systeme einer Fügetechnologie A_{jk}^ξ zum Setzen der Fügepunkte einer FP-Wolke k wird in Gleichung (4.66) ermittelt. Der erste Teil der Gleichung berechnet die Prozesszeit τ_j^f für alle FP, die in Wolke k mit FT j gefügt werden. Anschließend erfolgt die Berücksichtigung der Summe der Verfahrzeiten τ_j^v , die ein System benötigt, um von einem zum nächsten Punkt zu gelangen. Zur Ermittlung der verfügbaren Zeit wird die Zykluszeit τ^Z unter Berücksichtigung der Overall Equipment Efficiency ($OE E_j$) der jeweiligen FT herangezogen.

$$A_{jk}^\xi \geq \frac{\sum_{i=1}^{\alpha} x_{ijk} \cdot \tau_j^f + \left(\left(\sum_{i=1}^{\alpha} x_{ijk} \right) - 1 \right) \cdot \tau_j^v + w_{jk} \cdot h_k \cdot \tau^E}{(\tau^Z - \tau_k^S) \cdot OE E_j} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (4.66)$$

$$x_{ijk} \leq w_{jk} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.67)$$

Um Nebentätigkeiten wie beispielsweise das Abdichten einer Naht oder das Drehen von Baugruppen während der Zykluszeit zu berücksichtigen, wird eine wolkenpezifische

Sperrzeit τ_k^S ergänzt. Die Variable h_k entspricht der Anzahl der erforderlichen Einspannvorgänge in Wolke k . Die Einspannzeit τ^E muss ausschließlich dann berücksichtigt werden, wenn die FT j auch zum Fügen von Wolke k eingesetzt wird. Die Zuordnung wird mit der binären Variable w_{jk} umgesetzt, die den Wert eins annimmt, sobald FT j zum Fügen von Wolke k verwendet wird. Der Zusammenhang von w_{jk} zu x_{ijk} wird in Gleichung (4.67) beschrieben.

Weiterhin wird mit κ die begrenzt vorhandene Produktionsfläche berücksichtigt, die eine bestimmte Anzahl an Systemen maximal aufnehmen kann, um die Punkte der Wolke k zu fügen. Dieser Zusammenhang wird mit Gleichung (4.68) aufgezeigt.

$$\sum_{j=1}^{\beta} \sum_{k=1}^{\gamma} A_{jk}^{\xi} \cdot e_{km} \leq \kappa \quad \forall m \in M \quad (4.68)$$

Mit Gleichung (4.69) wird die Gesamtanzahl der benötigten Systeme A_l der jeweiligen Fügetechnologie-Gruppe l ermittelt. Die Fügetechnologie-Gruppen fassen die verschiedenen Variationen von Fügetechnologien in eine Gruppe zusammen, wie beispielsweise die unterschiedlichen Niet-Matrizen-Kombinationen, die der Menge J zugeordnet sind. Die unterschiedlichen Niet-Matrizen-Kombinationen gehören in dem Fall beispielsweise der Fügetechnologie-Gruppe Stanznieten an, die der Menge L angehört. Die Zusammenführung der verschiedenen Variationen in Gruppen ist erforderlich, um die Skalierungseffekte auf die einzelnen Fügetechnologie-Gruppen l zu beziehen. Daher wird mit der Gleichung (4.69) der Zusammenhang zwischen den Technologien, die der Menge J sowie der Menge L angehören, hergestellt. Da die Möglichkeit besteht, dass mit a_j bereits eine bestimmte Anzahl an Systemen einer Technologie j vorhanden ist, muss diese Menge von der Anzahl der anzuschaffenden Systeme abgezogen werden.

$$A_l \geq \sum_{j=1}^{\beta} \sum_{k=1}^{\gamma} A_{jk}^{\xi} \cdot q_{jl} - \sum_{j=1}^{\beta} a_j \quad \forall l \in L \quad (4.69)$$

Anschließend werden alle Fügepunkte vorab einer oder mehreren Fügepunkt-Wolken k zugeordnet. Hierzu wird die Variable b_{ik} eingeführt. Im Fall, dass der Fügepunkt i zu der Fügepunkt-Wolke k gehört, nimmt b_{ik} den Wert eins an. Durch Gleichung (4.70) wird sichergestellt, dass jeder Fügepunkt i ausschließlich in einer ihr zugeordneten Fügepunkt-Wolke k gesetzt wird. In Gleichung (4.71) wird des Weiteren definiert, dass jeder Fügepunkt einmal gesetzt werden muss.

$$x_{ijk} \leq b_{ik} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.70)$$

$$\sum_{j=1}^{\beta} \sum_{k=1}^{\gamma} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.71)$$

Weiterhin wird mit Gleichung (4.72) sichergestellt, dass ausschließlich Fügetechnologien in der Optimierung berücksichtigt werden, die eine technologische Realisierbarkeit im Rahmen des Screening-Modells gewährleisten können. Daher wird die binäre Eingangsgröße d_{ij} eingeführt, die bei keiner Realisierbarkeit des Fügepunkts i mit der Technologie j den Betrag null, bzw. bei Realisierbarkeit den Betrag eins aufweist.

$$x_{ijk} \leq d_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.72)$$

Gleichung (4.73) stellt für die ganzzahligen Entscheidungsvariablen sicher, dass diese keine negativen Werte annehmen können. Bei den Entscheidungsvariablen s_m , s_m^φ , x_{ijk} und w_{jk} handelt es sich um binäre Variablen, die den Wert eins oder null annehmen, wie in Gleichung (4.74) beschrieben.

$$A_{jk}^\xi, A_l, z_l \in \mathbb{N}_0 \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L \quad (4.73)$$

$$s_m, s_m^\varphi, w_{jk}, x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, m \in M \quad (4.74)$$

Als Ergebnis des ersten Schrittes der Optimierung erhält man somit die Zuordnung der Fügepunkte zu den einzelnen Technologien und die daraus resultierende Anzahl der benötigten Maschinen, wobei ausschließlich die ökonomische Dimension berücksichtigt wurde. Der Zielfunktionswert des ersten Schrittes mit den minimal erzielbaren Gesamtkosten CB_{min} wird als Eingangsgröße für den zweiten Schritt der Optimierung benötigt, der neben der monetären auch die nicht-monetäre Bewertung umfasst. Die für den zweiten Schritt der Optimierung verwendeten Entscheidungsvariablen werden im Folgenden durch ein ' gekennzeichnet. Die Zielfunktion des zweiten Schrittes der Optimierung in Gleichung (4.75) setzt sich ebenfalls aus zwei Teilen zusammen.

$$\max \frac{CB_{min}}{CB} + \frac{1}{\delta^b} \cdot \sum_{i=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{\beta} \sum_{k=1}^{\gamma} x'_{ijk} \cdot \frac{N_{ij}}{N_{max,i}} \quad (4.75)$$

Der erste Teil mit dem Verhältnis von CB_{min} und CB bildet den monetären Index M . Der CB entspricht dabei den Gesamtkosten basierend auf der im zweiten Optimierungsschritt ermittelten Zuordnung der Fügepunkte zu den Fügetechnologien. Analog zum CB_{min} setzt sich der CB in Gleichung (4.76) aus den Entstehungs- und variablen Kosten zusammen, die in Abhängigkeit zu der jährlichen Fahrzeuganzahl F stehen.

$$CB = \sum_{l=1}^{\delta} E'_l + \sum_{m=0}^{\varepsilon} G'_m \sum_{t=0}^T \frac{\sum_{i=1}^{\alpha} \sum_{j=1}^{\beta} \sum_{k=1}^{\gamma} x'_{ijk} \cdot V_j}{(1+r)^t} \cdot F \quad (4.76)$$

Im zweiten Teil der Zielfunktion erfolgt die technologische und ökologische Bewertung mit dem nicht-monetären Index N . Durch die in Kapitel 4.3 und 4.4 vorgestellte Bewertung erfolgt die Berechnung von N_{ij} für jede mögliche Kombination von Fügepunkten und

-technologien. Die nicht-monetäre Bewertung N_{ij} der Fügetechnologie j und des Fügepunkts i wird dabei ins Verhältnis zu der maximal erzielbaren Bewertung $N_{max,i}$ für den Fügepunkt i gesetzt. Analog zur monetären Bewertung bezieht sich die nicht-monetäre Bewertung durch Berücksichtigung der Gesamtanzahl von Fügepunkten δ^b auf einen einzelnen Fügepunkt. Für die weitere Optimierung im Rahmen des zweiten Schritts gelten die im ersten Schritt definierten Nebenbedingungen.

Durch den zweiten Schritt der Optimierung hinsichtlich monetärer sowie nicht-monetärer Faktoren erfolgt eine optimierte Zuordnung der einzelnen Fügepunkte zu den verfügbaren Fügetechnologien unter Berücksichtigung der formulierten Nebenbedingungen. Der resultierende sLI konsolidiert somit die Bewertungsergebnisse jedes einzelnen Fügepunkts i einer Fügeaufgabe mit der im Rahmen der Zuordnung ermittelten optimalen Fügetechnologie j , um eine ganzheitlich optimale Lösung auf Baugruppenebene zu identifizieren.

4.6 Identifikation werkstoff- und konstruktionsspezifischer Potentiale

Eine Fügestelle ist aufgrund diverser Restriktionen hinsichtlich Werkstoff und Konstruktion nicht mit jeder Fügetechnologie realisierbar. Dabei werden beide Bestandteile des Leichtbautrialogs als definierte Vorgaben an eine Fügetechnologie angesehen. Bei der singulären Bewertung einer Fügeaufgabe stellen die Vorgaben keine Problematik dar. Sobald jedoch die Bewertung einer Baugruppe mit mehreren Fügeaufgaben vorliegt, ist eine holistische Berücksichtigung der Korrelationen zwischen Fügetechnik, Werkstoff und Konstruktion unerlässlich (Kaspar, Choudry & Vielhaber, 2018). Die Analyse erfolgt in dem Potential-Modell, der vierten Komponente der Auswahlmethodik, in der durch werkstoff- oder konstruktionsspezifische Anpassungen zusätzliche Potentiale ausgeschöpft werden können. Tabelle 4.13 stellt eine exemplarische Fügeaufgabe dar.

Tabelle 4.13: Exemplarische Bewertung einer Fügeaufgabe mit dem sLI_{ij}

$j \backslash i$	FP ₁	FP ₂	FP ₃	FP ₄
FT ₁	0,5	0,6	0,6	0,6
FT ₂	0,9	0,0	0,9	0,8
FT ₃	0,8	0,0	0,0	0,9

FT₁ kann beispielsweise alle Fügepunkte realisieren, weist jedoch im Vergleich zur FT₂ einen geringeren sLI_{ij} auf. Der FP₂ kann jedoch aufgrund der Verletzung eines bindenden Kriteriums (Ausschlussfunktion) nicht mit der FT₂ realisiert werden. Das Ziel der Potentialanalyse ist das Aufzeigen von Möglichkeiten, um eine technologische

Realisierbarkeit der FT_2 durch eine werkstoff- oder konstruktionsspezifische Anpassung des FP_2 zu ermöglichen. Das Potential-Modell kann daher als Vorschlagswesen für den Produktentwickler dienen. Hierzu ist ein Werkstoff- sowie Konstruktionskatalog erforderlich. Eine Detaillierung der Kataloge findet in den folgenden Abschnitten statt.

4.6.1 Produktbeeinflussung durch Anpassung des Werkstoffs

Um eine Produktbeeinflussung hinsichtlich des Werkstoffs zu ermöglichen, ist ein Werkstoffkatalog erforderlich, der die im Karosserieleichtbau verwendeten Werkstoffe aufführt. Neben der Bezeichnung sowie der chemischen Zusammensetzung enthält der Katalog in Form einer relationalen Datenbank technisch-mechanische und chemische Eigenschaften sowie Verwertungskennzahlen. Tabelle 4.14 stellt einen Ausschnitt des entwickelten Werkstoffkatalogs dar.

Tabelle 4.14: Auszug aus dem Werkstoffkatalog (Materialdaten entnommen aus Granta Design (2018))

Werkstoffart	Werkstoffbezeichnung	Dichte [kg/m^3]	Preis [Euro]	E-Modul [N/mm^2]	Streckgrenze [N/mm^2]	Zugfestigkeit [N/mm^2]	Vickershärte [HV]	Korrosionsbeständigkeit	CO ₂ -Äquivalent
Stahl	HC260P	7850	0,52	210	290	400	131	2,5	0,0...0,12
Stahl	HC600C	7850	1,05	210	175	840	200	2,5	0,0...0,09
Aluminium	AA 6016	2700	1,67	69,5	30	100	25	3,5	-
Aluminium	AA 6181	2700	2,12	69,5	30	100	25	3,5	-

In Abbildung 4.38 wird die Vorgehensweise der Werkstoffanpassung aufgezeigt. Zu Beginn liegt eine Fügeaufgabe basierend auf der Werkstoffauswahl vor, welches durch einen Abgleich der Anforderungen einer Fügeaufgabe und der im Screening-Modell definierten werkstoffspezifischen Kernprämissen ermittelt wurde. Dabei kann es sich um einen einzelnen Fügepunkt oder aber auch um eine gesamte MDK handeln, welche mit einer Technologie, die einen vergleichsweise hohen sLI aufweist, nicht realisiert werden kann. Weiterhin kann zwischen der Anzahl der erforderlichen Werkstoffanpassungen differenziert werden. Durch den Ansatz der Nachbarschaftssuche können anschließend alternative

Werkstoffe ermittelt werden.¹⁰ Es wird zwischen dem Suchkriterium, dem Zielkriterium, der Lösungsmenge und dem Nebenkriterium unterschieden. Bei dem vorzunehmenden Abgleich wird die Kernprämisse, gegen die verstoßen wird, als Suchkriterium definiert. Daraus lässt sich das Zielkriterium ableiten, welches durch Definieren eines Vorgabewerts das Suchkriterium spezifiziert. Dabei werden die verschiedenen Werkstoff-Alternativen (w) nach den vorgegebenen Ausprägungen des Zielkriteriums und unter Berücksichtigung eventueller Nebenkriterien gefiltert, um die Lösungsmenge (m) zu ermitteln. Die Alternativen werden iterativ hinsichtlich der technologischen Realisierbarkeit geprüft, um potentielle Substitutionsmöglichkeiten aufzuzeigen. Im Fall, dass keine Alternative die Anforderungen erfüllen kann, ist kein weiteres Potential durch Werkstoffanpassungen vorhanden.

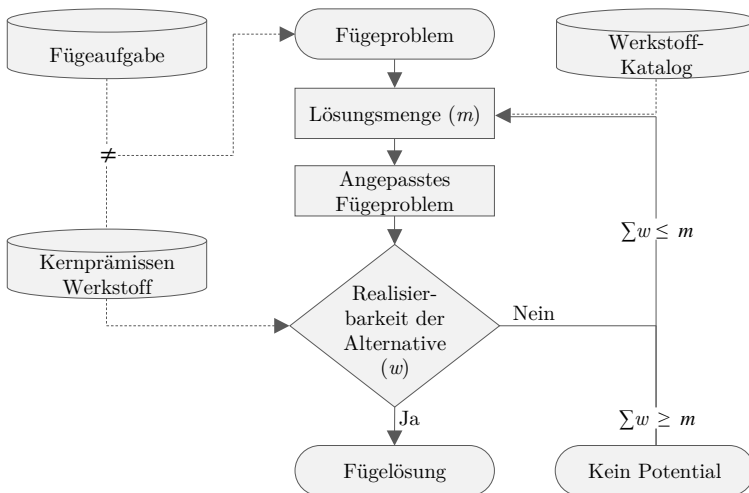


Abbildung 4.38: Ablauf der werkstofforientierten Produktbeeinflussung

Neben der Werkstoffsubstitution ist auch eine Werkstoffanpassung möglich, um die Realisierbarkeit einer spezifischen Technologie zu gewährleisten. Die Anpassung erfolgt dabei durch das kombinatorische Anpassen der Werkstoffdicke und -güte. Beispielsweise kann eine Füge-technologie sowohl aufgrund zu dünn, als auch aufgrund zu dicker Werkstoffe bestimmte Kernprämissen verletzen. Zu dünne Werkstoffe können z. B. durch dickere Werkstoffe mit einer niedrigeren Werkstoffgüte, zu dicke Werkstoffe durch dünnere mit einer höheren Werkstoffgüte substituiert werden.




¹⁰ Das Verfahren der Nachbarschaftssuche weist keine Verwandtschaft mit der gleichnamigen Heuristik aus dem Themenfeld des Operations Research auf.

4.6.2 Produktbeeinflussung durch Anpassung der Konstruktion

Die Realisierbarkeit einer Technologie kann neben werkstoff- auch aufgrund konstruktionsorientierter Faktoren eingeschränkt sein. Um das Produkt hinsichtlich der Verletzung konstruktiver Kernprämissen zu beheben, wird basierend auf den Anforderungen der VDI-Richtlinie 2232 (2004) ein Konstruktionskatalog entwickelt, der dem Produktentwickler gestalterische Lösungsvorschläge für spezifische Herausforderungen zur Verfügung stellt, die aus den Produkthanforderungen hervorgehen. Darauf basierend bildet insbesondere die Schaffung einer zweiseitigen Zugänglichkeit ein Hauptziel, welches durch Lösungsvorschläge des Katalogs erreicht werden soll. Dieses Ziel umfasst Ansätze für weitere konstruktive Anforderungen wie beispielsweise der Flanscherweiterung.

Tabelle 4.15 enthält einen Auszug aus dem entwickelten Konstruktionskatalog. Der Katalog dient dabei dem Konstrukteur als ein Vorschlagswesen, wie eine Fügeaufgabe durch konstruktive Änderungen am Bauteil verändert werden kann. Beispielsweise stellt das Versetzen der Verbindung eine konstruktive Lösung dar, wenn es zu einem Nebenschluss oder einer Kollision des Werkzeugs mit dem Bauteil kommt.¹¹ Im Fall, dass der Zugang des Werkzeugs zur Fügestelle durch das Werkstück verweigert wird, kann unter anderem das Schaffen eines Durchgangslochs eine Möglichkeit zur Lösung repräsentieren. Dazu wird in dem störenden Bauteil ein Loch angebracht, sodass das Werkzeug die zu verbindenden Teile erreichen kann. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die dadurch entstandenen Veränderungen am Bauteil einen Einfluss auf die Fahrzeugeigenschaften haben, welche folglich weitere Untersuchungen nach sich ziehen. Konstruktive Anpassungen können somit stellenweise die Geometrie und die Eigenschaften des Bauteils beeinflussen. Das Ziel ist in allen Fällen, dass keine weitere Verletzung der konstruktionsspezifischen Kernprämissen für die Füge Technologie entsteht.

Tabelle 4.15: Auszug aus dem Konstruktionskatalog

Ziel	Maßnahme	Piktogramm	Erläuterung
Beidseitige Zugänglichkeit herstellen	Verbindung versetzen		Nebenschluss durch benachbarte Fügepunkte oder Kollision des Werkzeugs mit dem Bauteil
Beidseitige Zugänglichkeit herstellen	Schaffen einer Anlagefläche		Werkstück verhindert den Zugang für das Werkzeug zur Fügestelle
Beidseitige Zugänglichkeit herstellen	Geometrieveränderung		Möglichkeit Störkonturen aufzuschneiden, zu kürzen oder aufzudrehen.

¹¹ Bei dem Nebenschlusseffekt handelt es sich um einen Verlust des zum Einsatz kommenden Stroms zur Herstellung eines Fügepunkts. Den Grund bildet ein bereits fertig gestellter Fügepunkt, welcher eine zu geringe Distanz zur neuen Fügestelle aufweist (Dilthey, 2006).

Im Gegensatz zur werkstofforientierten Produktbeeinflussung muss bei der konstruktiven Anpassung nicht das gesamte Bauteil berücksichtigt werden, sondern lediglich die nicht umsetzbaren Fügepunkte. Das Vorgehen schließt nicht aus, dass jede geometrische Änderung am Bauteil mit Auswirkungen auf die Karosserie verbunden sein kann. Darüber hinaus ist eine globale Betrachtung aller Fügepunkte zwingend erforderlich, wenn eine Anpassung auf Baugruppenebene erfolgen soll. In Abbildung 4.39 wird die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Suche nach konstruktiven Alternativen ersichtlich. Hierbei wird durch einen Abgleich der Fügeaufgabe und der im Screening-Modell definierten Kernprämissen untersucht, um welchen Verstoß es sich handelt. Darauf basierend können die für die Fügeaufgabe geeigneten Alternativen (k) im Konstruktions-Katalog ermittelt werden, welche die Lösungsmenge (m) darstellen. Diese werden iterativ hinsichtlich der konstruktiven Kernprämissen untersucht. Im Fall, dass keine Alternative die technologische Realisierbarkeit einer Füge-technologie erfüllen und somit keine Fügелösung ermittelt werden kann, besteht kein weiteres Potential durch Anpassungen der Konstruktion.

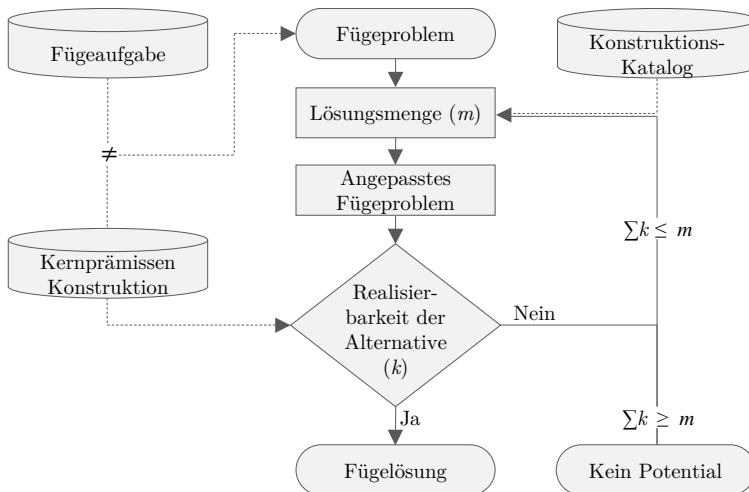


Abbildung 4.39: Ablauf der konstruktionsorientierten Produktbeeinflussung

4.7 Zwischenfazit: Multidimensionales Konzept der Auswahlmethodik

Das vorangegangene Kapitel hat sich mit der Entwicklung einer multidimensionalen Auswahlmethodik für Füge-technologien zur optimierten Entscheidungsfindung im Karosserie-

bau beschäftigt. Die Methodik besteht mit dem Screening-, Bewertungs-, Optimierungs- sowie Potential-Modell aus vier, iterativ aufeinander folgenden Komponenten.

Das Screening-Modell dient als Filterfunktion, die einen Abgleich zwischen den Anforderungen der Fügeaufgabe und den Kernprämissen der Fügetechnologien vornimmt. Die Kernprämissen stellen dabei die technologischen Anwendungsgrenzen der Technologien dar und werden in Konstruktions- und Werkstoff-Kernprämissen unterschieden.

In dem Bewertungs-Modell erfolgt eine multidimensionale Bewertung der Fügetechnologien, die neben ökonomischen auch ökologische und technologische Faktoren berücksichtigt. Die ökonomische Bewertungsmethodik basiert auf dem Kosten- und dem Unsicherheitsmodell. Im Rahmen des Kostenmodells wurden Einflussfaktoren ermittelt, sowie die ökonomischen Zusammenhänge zur Kostenberechnung aufgestellt. Im Rahmen des Unsicherheitsmodells wurden potentielle Risiken identifiziert und quantifiziert. Abschließend wurden beide Modelle zur ökonomischen Bewertung von Fügetechnologien unter Risiko in den Kosten-Index (KI_j) zusammengeführt. Für die ökologische Bewertung wurde die Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 (2009) herangezogen. Nach dem Festlegen des Untersuchungsrahmens wurde ein Energiereferenzzyklus zur Bestimmung von Energie- und Ressourcenflüsse aufgestellt, um eine objektive Gegenüberstellung der Fügetechnologien zu ermöglichen. Das folgende Berechnungsmodell dient dabei zur Bestimmung der ökologischen Auswirkungen der generierten Energie- und Ressourcenflüssen, um die Ergebnisse abschließend in den Sustainability-Index (SI_j) zusammenzuführen. Die technologische Bewertungsmethodik basiert auf dem Evaluations- und Gewichtungsmodell. Während das Evaluationsmodell die Charakterisierung der einzelnen technologischen Kriterien beinhaltet, erfolgt durch das Gewichtungsmodell eine realitätsnahe Priorisierung der technologischen Kriterien. Die Ergebnisse beider Modelle werden in dem Nutzwert-Index (NI_j) zusammengeführt, der durch die Berücksichtigung bauteilspezifischer Anforderungen einen direkten Bauteilbezug ermöglicht.

Die dritte Komponente der Auswahlmethodik stellt das Optimierungs-Modell dar. Dies führt die drei Dimensionen des Bewertungs-Modells in den strategischen Leistungs-Index (sLI_{ij}) zusammen. Da die Bewertung bisher auf Fügepunkt-Ebene begrenzt ist, wurde ein Optimierungsproblem formuliert, um die optimale Lösung auf Baugruppenebene ermitteln zu können. Das Optimierungsproblem besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird ausschließlich die ökonomische Seite berücksichtigt, um die Lösungsmenge mit den minimalen Kosten zu ermitteln. Mit dieser Eingangsgröße erfolgt im zweiten Schritt die Berücksichtigung der nicht-monetären Faktoren. Das Ergebnis des zweiten Schritts liefert zur Lösung der gesamten Fügeaufgabe eine optimierte Zuordnung der Fügepunkte zu den Fügetechnologien und führt die Bewertungsergebnisse anschließend in den sLI zusammen.

In dem Potential-Modell, der letzten Komponente der Auswahlmethodik, werden für eine ganzheitliche Berücksichtigung zusätzlich die Korrelationen zwischen Fügetechnologie, Werkstoff und Konstruktion untersucht. Um weitere Potentiale auszuschöpfen, sollen

durch Anpassungen werkstoff- oder konstruktionsspezifische Restriktionen von Füge-technologien für einzelne Fügeaufgaben eliminiert werden. Hierzu wurde ein Werkstoff- und Konstruktionskatalog entwickelt, der den Konstrukteur bei werkstoff- und konstruk-tionsorientierten Anpassungen unterstützen soll.

In Abbildung 4.40 werden die einzelnen Komponenten zusammengeführt, um den schematischen Ablauf der Auswahlmethodik in Form eines Flussdiagramms aufzuzeigen. Nachdem die Detaillierung der Auswahlmethodik abgeschlossen ist, widmet sich das folgende Kapitel der Validierung und Umsetzung der Methodik.

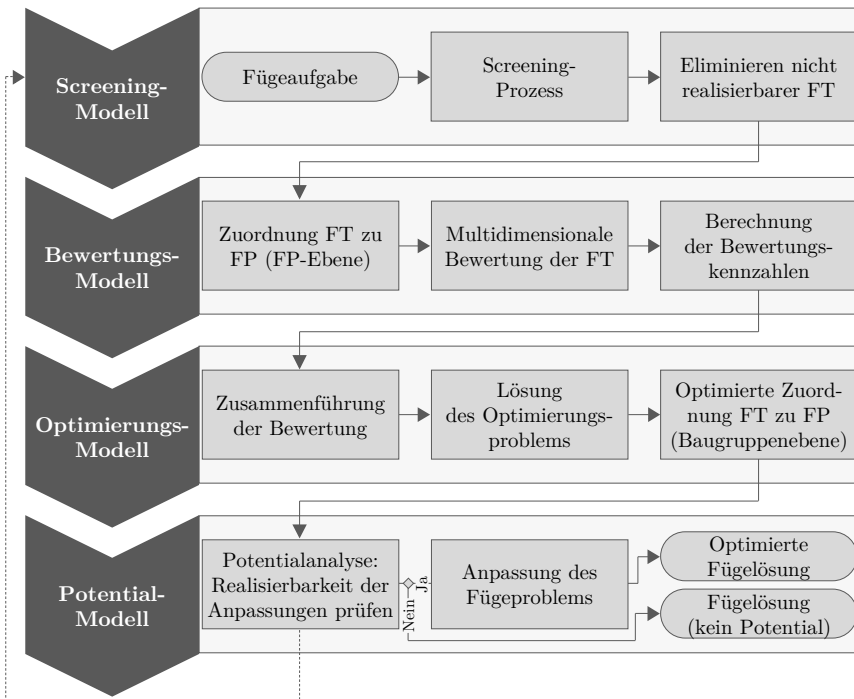


Abbildung 4.40: Ablauf der Auswahlmethodik mit FT = Fügetechnologie und FP = Fügepunkt

Validierung und prototypische Umsetzung in einem Auswahlwerkzeug

Nach der Entwicklung und Detaillierung der Auswahlmethodik im vorausgegangenen Kapitel beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Validierung der Methodik anhand eines exemplarischen Anwendungsfalls aus dem Karosseriebau. Hierbei wird die Arbeitsweise für die einzelnen Komponenten durch eine systematische Anwendung der Auswahlmethodik auf eine Baugruppe aufgezeigt. Es wird ersichtlich, dass die einzelnen Rechenoperationen innerhalb des Auswahlprozesses aufgrund der Komplexität einen hohen Berechnungsaufwand darstellen. Anschließend wird auf eine Umsetzung der Methodik in ein Auswahlwerkzeug eingegangen, um einen effizienten Auswahlprozess durch eine softwareunterstützte Lösung zu ermöglichen. Hierzu wird neben der eigentlichen Integration des Auswahlwerkzeugs in den Produktentstehungsprozess die Architektur sowie die Gestaltung der Anwendung diskutiert. Abschließend erfolgt eine kritische Bewertung und Diskussion des entwickelten Konzepts, um weiteres Optimierungspotential für die Zukunft aufzuzeigen.

5.1 Validierung der Auswahlmethodik

Für die Validierung der Auswahlmethodik erfolgt im ersten Abschnitt eine Vorstellung des Anwendungsfalls. Hierzu wird eine Einordnung der Baugruppe in die Gesamtkarosserie vorgenommen, um die funktionellen Eigenschaften sowie die Relevanz des Anwendungsfalls aufzuzeigen. Da es sich hierbei um eine bereits in Produktion befindliche Baugruppe handelt, die in einem Fahrzeugprojekt Einsatz findet, wird des Weiteren das bestehende Anlagenlayout vorgestellt, welches als Referenz für den anschließenden Auswahlprozess dient. Dabei werden im letzten Schritt die Ergebnisse der exemplarischen Anwendung der Auswahlmethodik mit dem bestehenden Konzept abgeglichen, um mögliche Potentiale der Methodik aufzuzeigen.

5.1.1 Darstellung des Anwendungsfalls

Die Karosserie eines Automobils wird sukzessive aus verschiedenen Baugruppen aufgebaut, die im fortschreitenden Fertigungsstadium in größere Einheiten zusammengeführt werden. Basierend auf der grundsätzlichen Fügefolge lässt sich nach Friedrich (2013) die Karosserie mit dem Unterbau, Aufbau, Dach sowie Anbauteilen in vier Bereiche aufteilen. Bei dem für die Validierung herangezogenen Anwendungsfall handelt es sich um eine Baugruppe des Unterbaus, der sich wiederum aus dem Vorderwagen sowie dem vorderen und hinteren Unterboden zusammensetzt. Dabei stellt im Rahmen der Validierung der hintere Unterboden die zu untersuchende Baugruppe dar.

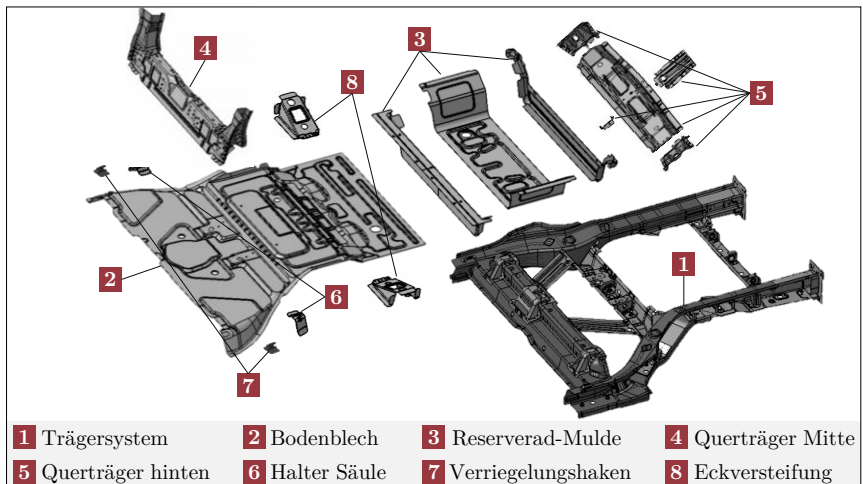


Abbildung 5.1: Überblick des Unterbodens anhand einer Explosionsdarstellung

Die Basis eines Unterbodens sind die Quer- und Längsträger. Dabei wird der mittlere Querträger des Hinterbodens zur Stabilisierung des Bodens im Bereich der hinteren Sitze eingesetzt, sodass dieser während der Fahrt keine zu intensive Biegebeanspruchung erfährt. Des Weiteren arbeitet er im Falle eines Heckaufpralls der Deformation des Unterbodens entgegen. Der hintere Querträger ist ebenfalls bei einem Heckaufprall von hoher Bedeutung und erhöht die Torsionssteifigkeit, die im Crashfall ein unkontrolliertes Ausknicken des Hinterrahmens verhindert. Das Trägersystem, welches aus Quer- und Längsträgern besteht, steigert zusätzlich die Torsionssteifigkeit im Unterboden. Da im Bereich des hinteren Unterbodens auch das hintere Fahrwerk angebunden wird, treten dementsprechend hohe Kräfte auf, die aufgenommen werden müssen (Zeller, 2012, S. 114). Die Halterungen, Verriegelungshaken sowie Eckversteifungen dienen in der Baugruppe als Fixier- und Befestigungspunkte für Teile wie beispielsweise Heckleuchten oder Sicherheitsgurtschlösser (Klug, 2010). Die Reserverad-Mulde, die zum einen für das sichere Lagern des Ersatzrads erforderlich ist, dient weiterhin zur Versteifung des Hinterwagens. Eine Übersicht der einzelnen Komponenten der Baugruppe kann der Explosionsdarstellung in Abbildung 5.1 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Anzahl der Fügepunkte für das Verbinden der einzelnen Komponenten

Komponente 1	Komponente 2	Trägersystem	Bodenblech	Reserverad-Mulde	Querträger Mitte	Querträger hinten	Halter Säule	Verriegelungshaken	Eckversteifung
Trägersystem		10	11	2	1	15	0	0	0
Bodenblech		169	0	0	1	18	6	4	4
Reserverad-Mulde		9	11	46	1	0	0	0	6
Querträger Mitte		29	21	0	0	0	0	0	0
Querträger hinten		20	10	0	0	25	0	0	0
Eckversteifung		12	0	0	0	0	0	0	0

Bei den Komponenten handelt es sich verstärkt um 2-Blech-Mischbauverbindungen mit Einsatz von Aluminium sowie warm- und kalt-umgeformtem Stahl, was wiederum zu einer besonders hohen Diversität an Fügetechnologien führt.¹ In Tabelle 5.1 werden die einzelnen Fügepartner der Baugruppe definiert. Des Weiteren kann der Tabelle die Anzahl der zu setzenden Fügepunkte für die jeweilige Verbindung entnommen werden.

¹ Für das Validierungsbeispiel wird aus Gründen der Geheimhaltung im Folgenden ausschließlich zwischen den Materialien Aluminium und Stahl unterschieden und nicht weiter auf die spezifischen Legierungszusammensetzungen eingegangen.

Dabei wird ersichtlich, dass ein wesentlicher Anteil an Fügepunkten für das Verbinden des Bodenblechs mit dem Trägersystem benötigt wird.

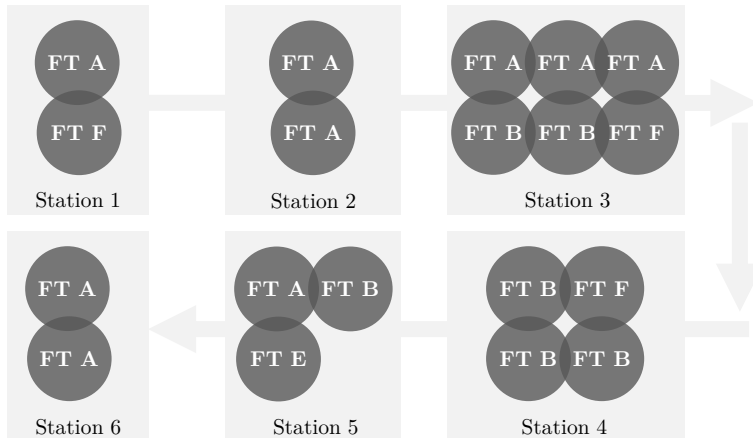


Abbildung 5.2: Schematisches Anlagenlayout des Ist-Zustands

Zur Definition der Fügefolge zeigt Abbildung 5.2 schematisch das bestehende Anlagenlayout für den Unterboden. Das Fügen der Baugruppe erfolgt in sechs Stationen, bei denen insgesamt 19 Fügesysteme von FT A, FT B, FT E und FT F zum Einsatz kommen.² Während in Station 1 die Reserverad-Mulde gefügt wird, erfolgt das Zusammenführen der Mulde mit dem Bodenblech in Station 2. In den Stationen 3 und 4 wird das Bodenblech mit dem Trägersystem verbunden. Der in einem vorgelagerten Prozess bereits gefügte mittlere Querträger wird in Station 5 mit dem Bodenteil verbunden. Das Fügen des hinteren Querträgers erfolgt direkt in Station 6, bevor es anschließend mit dem Bodenblech verbunden wird. Im Rahmen der vorausgegangenen multidimensionalen Bewertung konnte ein *sLI* in Höhe von 0,59 ermittelt werden. Die Lebenszykluskosten des gesamten Anlagenkonzepts betragen in dem Ist-Zustand über Projektlaufzeit 6.133.071 Euro.

5.1.2 Exemplarische Anwendung der Auswahlmethodik

Nach der Vorstellung des Anwendungsfalls erfolgt die Validierung der in Kapitel 4 entwickelten und aufeinander aufbauenden vier Modelle der Auswahlmethodik anhand der exemplarischen Baugruppe. Den Anfang der Auswahlmethode stellt das Screening-Modell dar. Mit der anschließenden multidimensionalen Bewertung erfolgt das Zusammenbringen

² Aus Gründen der Geheimhaltung wird auf exakte Bezeichnungen der eingesetzten Fügetechnologien verzichtet.

der Informationen im Optimierungs-Modell. Zuletzt wird das Potential-Modell eingesetzt, um zusätzliche Einsparmöglichkeiten zu identifizieren.

Screening-Modell In dem ersten Schritt der Auswahlmethodik werden Technologien ausgeschlossen, die aufgrund ihrer werkstoff- oder konstruktionsspezifischen Anforderungen die spezifischen Fügeaufgaben nicht realisieren können. Der Screening-Prozess erfolgt in vier Schritten. Zu Beginn werden alle Technologien charakterisiert und darauf basierend die Kernprämissen definiert und in einer Abgleichs-Datenbank hinterlegt. Tabelle 5.2 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Datenbank mit den Kernprämissen Werkstoff, Dicke sowie Zugänglichkeit. Weitere Faktoren sind unter anderem die Anzahl der zu fügenden Bleche einer Verbindung oder die Oberflächeneigenschaften des Werkstoffs.

Tabelle 5.2: Schematischer Ausschnitt der definierten Kernprämissen

FT	Werkstoff 1	Dicke 1	Werkstoff 2	Dicke 2	Zugänglichkeit
FT A	Aluminium	1,0-2,0mm	Stahl	1,5-2,0mm	beidseitig
FT B	Aluminium	1,0-1,5mm	Aluminium	1,0-2,0mm	beidseitig
FT C	Stahl	0,8-2,0mm	Stahl	1,0-2,5mm	einseitig
FT D	Stahl	0,5-1,5mm	Stahl	1,0-2,5mm	beidseitig

Im zweiten Schritt wird die Fügeaufgabe der einzelnen MDK betrachtet. Basierend auf der Fügeaufgabe werden die Anforderungen abgeleitet, die, identisch zu den Kernprämissen, Ausprägungen wie beispielsweise Werkstoff, Dicke oder Zugänglichkeit umfassen. Die Informationen werden dabei durch verschiedene Systeme bereitgestellt. Während die Werkstoffinformationen beispielsweise den Stücklisten entnommen werden können, muss für das Kriterium Zugänglichkeit das CAD-Modell herangezogen werden. Ein Ausschnitt relevanter Anforderungen der MDK kann der Tabelle 5.3 entnommen werden.

Tabelle 5.3: Schematischer Ausschnitt der relevanten Anforderungen

MDK	Werkstoff 1	Dicke 1	Werkstoff 2	Dicke 2	Zugänglichkeit
MDK 1	Stahl	1,2mm	Aluminium	1,8mm	einseitig
MDK 2	Aluminium	1,3mm	Aluminium	1,3mm	beidseitig
MDK 3	Stahl	1,3mm	Stahl	1,5mm	beidseitig

Mit dem anschließenden Abgleich der Anforderungen der MDK mit den Ausprägungen der Fügetechnologien im dritten Schritt wird überprüft, ob die für die einzelnen Fügetechnologien festgelegten Kernprämissen durch die Anforderungen der Fügeaufgabe verletzt werden. Durch den Abgleich der untersuchten Baugruppe werden die Fügetechnologien im letzten Schritt eliminiert, die eine Verletzung der Kernprämissen aufweisen.

Durch die Eliminierung kann die Anzahl der Handlungsmöglichkeiten für die einzelnen MDK eingeschränkt werden, um einen effizienten Auswahlprozess zu ermöglichen. Ein Ausschnitt des Abgleichs kann Tabelle 5.4 entnommen werden, in der insgesamt sechs Fügetechnologien zur Auswahl stehen. Dabei kann für die erste MDK jedoch nur die im Bewertungs-Modell untersuchte FT A, B und C eine technologische Realisierbarkeit aufweisen. Für die zweite und dritte MDK hingegen ist grundsätzlich auch ein Einsatz weiterer Fügetechnologien möglich.

Tabelle 5.4: Schematischer Ausschnitt des Abgleichs der für den Anwendungsfall relevanten Anforderungen mit den definierten Kernprämissen

MDK	FT A	FT B	FT C	FT D	FT E	FT F
MDK 1	✓	✓	✓	X	X	X
MDK 2	X	✓	✓	X	✓	✓
MDK 3	✓	X	X	✓	X	✓

Bewertungs-Modell Die theoretisch realisierbaren Fügetechnologien, die im Rahmen des Screening-Modells identifiziert werden konnten, sind im folgenden Schritt für die jeweilige MDK zu untersuchen. Um den Ablauf der multidimensionalen Bewertung schematisch aufzuzeigen sowie die Validierung vorzunehmen, wird eine repräsentative MDK aus dem Anwendungsfall herangezogen. Hierbei handelt es sich um die MDK 1, eine Mischbauverbindung, für die mit FT A, B und C drei mögliche Handlungsalternativen zur Verfügung stehen. Für die Durchführung der Bewertung müssen im ersten Schritt die grundsätzlichen Prämissen des Anwendungsfalls ermittelt werden. Tabelle 5.5 listet die erforderlichen Prämissen auf, die insbesondere für die ökonomische sowie ökologische Bewertung von hoher Relevanz sind. Die Bewertung der MDK hinsichtlich der verschiedenen Dimensionen basiert, in Anlehnung an das im Kapitel 3.3.2 vorgestellte mehrstufige Bewertungskonzept mit der statischen, semi-dynamischen und dynamischen Bewertung, auf drei Stufen.

Für die *ökonomische Bewertung* ist im ersten Schritt eine Charakterisierung der Fügetechnologien hinsichtlich zeitunabhängiger Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Verwertungskosten oder OEE erforderlich (Tabelle 5.6). Diese Informationen beruhen auf historische bzw. empirische Daten und sind daher bereits in der sehr frühen Produktentstehungsphase vollständig verfügbar. Weitere zeitunabhängige Kostenfaktoren im Rahmen des Validierungsbeispiels sind die Personal-, Energie- und Instandhaltungskosten.³

³ Bei einer ausreichend detaillierten Datenbasis besteht die Möglichkeit der Differenzierung der Kosten für die einzelnen Bewertungsstufen. Um die Komplexität des Anwendungsfalls zu minimieren, wird jedoch auf eine Differenzierung dieser Kosten verzichtet.

Tabelle 5.5: Allgemeine Annahmen für den Anwendungsfall

Berechnungsvariable	Symbol	Wert
Lernrate	α	0,05
Jährliche Ausbringungsmenge	δ_t	80.000
Anzahl FP pro Bauteil bzw. MDK	δ^b	78
Projektlaufzeit (Jahre)	T	8
Max. Anzahl an Systemen pro Station m	κ	4-6
Einsparfaktor durch Skalierungseffekte	λ	0,05
Kapitalkostensatz vor Steuern (%)	r	0,09
Steuersatz (%)	s	35,00
Technische Anlageneinschaltdauer (h/Jahr)	D^{tech}	3776,00
Taktzeit (s)	τ^Z	164,00
Einspannzeit (s)	τ^E	12,00
Verfahrzeit (s)	τ^v	1,5
Einschaltdauer pro Schicht (min)	τ^{ES}	388
Anzahl Schichten	S	3
Indikator Strommix DE (kgCO ₂ /kWh)	—	0,610
Indikator Ökostrom DE (kgCO ₂ /kWh)	—	0,050
Materialstoffindikator (kgCO ₂ /kg)	—	0,546
Energiekostensatz (Euro/kWh)	$\beta_{E,S}$	0,12
↪ Wachstumsrate der Energiekosten (%)	—	0,050
↪ Angepasste Standardabweichung	σ^*	0,100
Personalkostensatz (Euro/h)	β^P	50,00
↪ Wachstumsrate der Personalkosten (%)	—	0,030
↪ Angepasste Standardabweichung	σ^*	0,032

Zu den zeitabhängigen Kosten gehören neben den Investitions- und Elementkosten, die Ausbringungsmenge sowie die Information, ob Fügesysteme mit verfügbarer Fertigungskapazität bereits vorhanden sind. Bei der statischen Bewertung ist der Lieferant eines Fügesystems bzw. -elements noch nicht bekannt und somit ist eine Auskunft über die verhandelten Preise für das Projekt in dieser Phase nicht möglich. Daher werden für die statische Bewertung gemittelte Kosten aus vorausgegangenen Projekten herangezogen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass keine bestehenden Systeme in der Anlagenlandschaft bestehen, die nicht bereits vollständig ausgelastet sind. Da zu dem Zeitpunkt die

Produktionsleistung nicht bekannt ist, wird für δ_t eine idealisierte Ausbringungsmenge angenommen. Weiterhin wird bei der statischen Bewertung die Annahme getroffen, dass für die einzelnen Füge Technologien jeweils ein Füge system erforderlich ist. Somit kommen in der statischen Bewertung keine Skalierungseffekte zum Tragen. Erfahrungskurven-, Steuer- und Zinseffekte sowie Unsicherheiten finden hingegen bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten in der frühen Phase bereits Berücksichtigung. Unter diesen Annahmen repräsentiert die FT A mit den geringsten Investitions- sowie variablen Kosten für die statische Bewertungsstufe die monetär vorteilhafteste Füge Technologie.

Tabelle 5.6: Durchführung und Validierung der ökonomischen Bewertung von Füge Technologien unter Risiko

		MDK 1		
Kosteninformationen		FT A	FT B	FT C
Zeitunabhängig	Vorrichtungskosten (G_m)	120.000 €	120.000 €	120.000 €
	Energiekosten (β^E)	0,008 €/FP	0,007 €/FP	0,006 €/FP
	Personalkosten (β^P)	0,004 €/FP	0,003 €/FP	0,003 €/FP
	Instandhaltungskosten (β^{IH})	0,003 €/FP	0,001 €/FP	0,002 €/FP
	Verwertungskosten (W)	-20.000 €	-30.000 €	-25.000 €
	OEE	0,96	0,95	0,95
	Prod. Stückzahl bei $t=0$ (δ_0)	80.000	30.000	10.000
	Prozesszeit (τ^f)	2,2	3,9	2,7
Statisch	Preis eines Füge systems (f)	280 T€	290.000 T€	300.000 T€
	Ideale Ausbringungsmenge (δ_t)	1.300.000 FP/Jahr		
	Elementkosten (β^M)	0,02 €/FP	0,06 €/FP	0,05 €/FP
	Freie Kapazitäten (η^{frei})	–	–	–
	Gesamtkosten (LZK)	477.553 €	594.516 €	501.779 €
	Bewertung (KI)	1,00	0,80	0,95
Semi-dynamisch	Preis eines Füge systems (f_+/f_-)	230/290 T€	280/320 T€	270/300 T€
	Elementkosten (β_{M+}/β_{M-})	0,01/0,02 €/FP	0,05/0,06 €/FP	0,03/0,04 €/FP
	Freie Kapazitäten ($\eta_+^{frei}/\eta_-^{frei}$)	0,0/0,0	1,0/0,0	1,0/0,0
	Gesamtkosten (LZK_+/LZK_-)	1.078.599 €/	1.614.273 €/	1.057.088 €/
		1.418.251 €	2.061.291 €	1.437.255 €
	Bewertung (KI_+/KI_-)	1,00/0,75	0,88/0,51	1,00/0,75
Dynamisch	Preis eines Füge systems (f)	270 T€	280 T€	270 T€
	Elementkosten (β^M)	0,02 €/FP	0,05 €/FP	0,03 €/FP
	Freie Kapazitäten (η^{frei})	0,0	1,0	0,0
	Gesamtkosten (LZK)	1.387.934 €	1.616.904 €	1.229.467 €
	Bewertung (KI)	0,89	0,76	1,00

In der semi-dynamischen Bewertung, die das günstigste sowie ungünstigste mögliche Szenario untersucht, werden die Informationen wie beispielsweise die Kosten für ein Fügeelement als Preisspanne angegeben, falls der konkrete Wert zu dem Zeitpunkt noch nicht bekannt ist. Im günstigsten Fall können FT B und FT C ein bestehendes Fügeelement nutzen. FT B stellt dennoch aufgrund der hohen laufenden Kosten im günstigsten sowie ungünstigsten Fall die kostenintensivste Handlungsalternative dar. FT C kann hingegen bei einem bestehenden System sowie dem Lernkurveneffekt im günstigsten Fall die geringsten Kosten aufweisen. Im Szenario, dass FT C nicht auf ein bestehendes System zurückgreifen kann, stellt FT A aufgrund der geringeren Investitions- und laufenden Kosten die optimale Handlungsempfehlung dar.

Die dynamische Bewertung, die zu einem Zeitpunkt stattfindet, in dem Informationen wie Lieferant oder Einkaufspreise für ein Fügeelement vollständig vorhanden sind, bietet die präziseste Bewertung. Im Rahmen der dynamischen Bewertung konnte beispielsweise festgestellt werden, dass trotz identischer Investitionskosten von FT A und C sowie geringerer laufender Kosten der FT A, die FT C auch ohne bereits bestehende Fügeelemente die optimale Lösung darstellt. Die geringeren zu erwartenden LZK der FT C begründen sich durch den Lernkurveneffekt. Da FT C bisher eine sehr geringe produzierte Stückzahl δ_0 aufweist, greift der Erfahrungskurveneffekt bei FT C deutlich stärker als bei FT A.

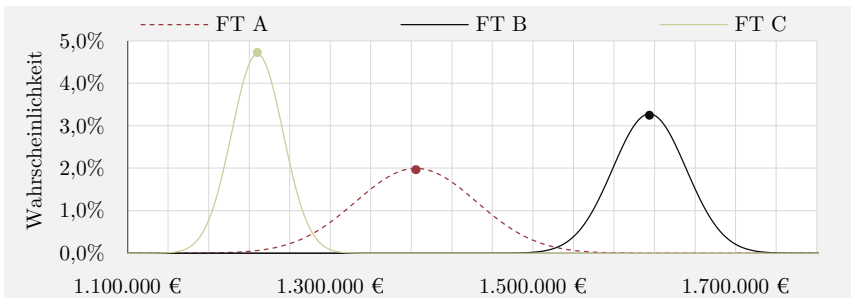


Abbildung 5.3: Monte Carlo Simulation: Wahrscheinlichkeitsverteilung der LZK für die einzelnen Fügetechnologien unter Risiko

Da die ökonomische Bewertung und somit die Berechnung der LZK der einzelnen Fügetechnologien Unsicherheiten unterliegen, wurde mit dem Unsicherheitsmodell das Risiko ermittelt, dem die Fügetechnologien unterliegen. Für den Anwendungsfall wurden in Tabelle 5.5 mit den Energie- und Personalkosten zwei unsichere Faktoren berücksichtigt. Der Einfluss dieser Unsicherheiten wurde mit der im Kapitel 4.2.3 vorgestellten Monte Carlo Simulation untersucht und in Abbildung 5.3 aufgezeigt. Das Ergebnis stimmt mit der ökonomischen Bewertung überein, da der Erwartungswert der FT C die geringsten LZK aufweist (siehe Tabelle 5.6). Weiterhin ist im Vergleich zu FT A oder B die FT C

einem geringeren Risiko ausgesetzt. Dieser Effekt lässt sich durch den abweichenden Kostensatz der Füge Technologien beschreiben. FT C weist die geringsten Energie- und Personalkosten auf und ist daher den Unsicherheiten nicht in der Form ausgesetzt wie FT A, die aufgrund dessen die höchste Standardabweichung aufweist.

Analog zur ökonomischen Bewertung existieren bei der *ökologischen Bewertung* zeitunabhängige Informationen, wie beispielsweise die Scherzugfestigkeit einer Füge Technologie zur Berücksichtigung der funktionellen Einheit (siehe Tabelle 5.7). Zur Durchführung der statischen Bewertung wird der Energiebedarf über historische Daten gemittelt, da weder der Lieferant des Fügesystems noch die zu fügende MDK zu dem Zeitpunkt bekannt sind. Weiterhin ist für die Wirkungsabschätzung der in Tabelle 5.5 angegebene Indikator für den Strommix aus Deutschland angesetzt worden, der die Umweltbelastung der verschiedenen in Deutschland eingesetzten Energieträger wie beispielsweise Kohle- oder Kernenergie zusammenfasst (Umweltbundesamt, 2018). Durch die Verrechnung des Material- und Stromindikators mit dem Druckluft- und Strombedarf, kann die durch das Fügen eines Fügepunkts entstehende Umweltbelastung ermittelt werden. FT B weist die höchste Festigkeit aber auch den höchsten Energiebedarf auf. FT A hat hingegen einen deutlich geringeren Energiebedarf und kann daher im Rahmen der statischen Bewertung als die ökologisch vorteilhafteste Handlungsempfehlung identifiziert werden.

Tabelle 5.7: Durchführung und Validierung der ökologischen Bewertung von Füge Technologien

				MDK 1
LCA-Informationen		FT A	FT B	FT C
Zeitunabhängig	Scherzugfestigkeit (Newton)	3900	4500	3600
	Gewicht Fügeelement (Gramm)	0,72	1,60	0,80
	Druckluftenergiebedarf (Ws/FP)	3614	8087	7278
Statisch	Energiebedarf/ FP (Ws/FP)	2700	2844	2560
	Strombezug bzw. -indikator	Strommix DE		
	Umweltbelastung/ FP (GWP)	0,001462	0,002725	0,002103
	Bewertung (SI)	0,90	0,54	0,56
Semi-dynamisch	Energiebedarf/ FP (Ws_+/Ws_-)	2545/2722	2300/2993	1867/2603
	Strombezug bzw. -indikator	Ökostrom DE/Strommix DE		
	Umweltbelastung (GWP_+/GWP_-)	24205/63603	51913/125722	28943/93389
	Bewertung (SI_+/SI_-)	0,87/0,87	0,47/0,51	0,67/0,55
Dynamisch	Energiebedarf/ FP (Ws/FP)	2602	2424	1939
	Strombezug bzw. -indikator	Strommix DE		
	Umweltbelastung (GWP)	62818	122000	89046
	Bewertung (SI)	0,87	0,52	0,56

Die semi-dynamische Bewertung geht im günstigsten Fall davon aus, dass der Strombezug über regenerative Energien erfolgt und somit der Indikator für den Ökostrom aus Deutschland herangezogen werden kann. Dabei wird ersichtlich, dass FT A und FT C dadurch deutlich besser gestellt werden. Der Sustainability-Index *SI* beider Technologien ist im günstigsten Szenario identisch bzw. für FT C teilweise höher als der *SI* im ungünstigsten Szenario. Bei FT B hingegen ist aufgrund des weiterhin unverändert hohen Druckluftbedarfs eine Verschlechterung des *SI* im günstigsten Szenario festzustellen. FT A stellt weiterhin die ökologisch vorteilhafteste Handlungsempfehlung dar.

Die dynamische Bewertung weist ähnliche Ergebnisse wie das ungünstigste Szenario der semi-dynamischen Bewertung auf. FT C benötigt den geringsten elektrischen Energiebedarf, jedoch weist die Technologie einen höheren Druckluftbedarf sowie eine geringere Festigkeit im Vergleich zu FT A auf. Somit stellt im Rahmen der dynamischen Bewertung die FT A die optimale Handlungsempfehlung dar.

Für die *technologische Bewertung* erfolgte im ersten Schritt eine Identifizierung und Charakterisierung der globalen (*G*), lokalen (*L*) sowie Ausschlusskriterien (*E*). Für die Bewertung wird eine Skala von null bis neun herangezogen. Anschließend erfolgt mit dem in Kapitel 4.4.3. vorgestellten paarweisen Vergleich die Ermittlung der Gewichtungsfaktoren. Ein Auszug der für den Karosseriebau relevanten technologischen Einflusskriterien und der ermittelten Gewichtungsfaktoren ist Tabelle 5.8 zu entnehmen.

Da im Rahmen der statischen Bewertung kein Bauteilbezug vorhanden ist, sind in dieser Stufe noch keine Anforderungen des Bauteils an die Fügetechnologie bekannt. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Fügerichtung der FT B und C sowie die Zugänglichkeit aller Fügetechnologien eingeschränkt ist. Obwohl zu dem Zeitpunkt noch keine Information vorhanden ist, welche auf die Erfordernis der Fügerichtung oder einseitige Zugänglichkeit hinweist, erhalten die Technologien in der statischen Bewertung einen vergleichsweise geringen Gesamtwert. Für die statische Bewertung wird die FT C als technologisch vorteilhafteste Handlungsempfehlung identifiziert.

In der semi-dynamischen Bewertung erfolgt der erstmalige Bauteilbezug. Daher können für lokale Kriterien erste Anforderungen definiert werden. Für die MDK 1 ist beispielsweise keine einseitige Zugänglichkeit erforderlich. Weiterhin ist für den Anwendungsfall die Anmutung von keiner Bedeutung, da keines der Bauteile im Sichtbereich eingesetzt wird. Besonders hohe Anforderungen haben die Kriterien Korrosionsbeständigkeit und Dichtheit. Während jede Technologie einen Korrosionsschutz liefert, kann ausschließlich die FT B eine vollständige Dichtheit gewährleisten. Somit erfahren FT A und C eine Bestrafung. Die Festigkeit sowie die Flanschbreite stellen hingegen im günstigsten Szenario Anforderungen, welche von jeder Fügetechnologie erfüllt werden können. Jedoch kann im ungünstigsten Szenario ausschließlich FT B die Anforderung an die Festigkeit und FT C die Anforderung an die Flanschbreite erfüllen. Somit greift auch hier die Straffunktion. Falls das günstigste Szenario eintritt, stellt FT A die technologisch optimale Handlungsempfehlung dar. Im ungünstigsten Szenario ist es hingegen FT B.

Die dynamische Bewertung konkretisiert die semi-dynamische Bewertung mit den tatsächlichen Anforderungen an das Bauteil. Die Anforderungen ähneln denen des ungünstigsten Szenarios der semi-dynamischen Bewertung. Ausschließlich FT B kann alle definierten Anforderungen zufriedenstellend erfüllen. FT A sowie FT C erhalten eine Bestrafung. Daher repräsentiert die FT B die technologisch optimale Handlungsempfehlung.

Tabelle 5.8: Durchführung und Validierung der technologischen Bewertung von Füge-technologien

						MDK 1	
Kriterium (c)	Gewichtung (w)	Anforderung (r)		FT A	FT B	FT C	
		Stat.	Semi-dynamisch				Dynamisch
Maßhaltigkeit	85 %	–	– (G)	– (G)	7	9	9
Gewicht Element	14 %	–	– (G)	– (G)	7	5	7
Min. Fügeabstand	27 %	–	– (G)	– (G)	5	4	4
Fügeposition	58 %	–	– (G)	– (G)	9	4	4
Spaltüberbrückung	41 %	–	– (G)	– (G)	9	7	5
Toleranz Werkstoff	44 %	–	– (G)	– (G)	5	9	8
Toleranz Dicke	50 %	–	– (G)	– (G)	6	5	5
Toleranz Oberfläche	33 %	–	– (G)	– (G)	8	9	8
Flexibilität MDK	89 %	–	– (G)	– (G)	7	6	4
Fügerichtung	82 %	–	– (G)	– (G)	4	0	0
Benutzerfreundlich	27 %	–	– (G)	– (G)	8	5	5
Zangengeometrie	73 %	–	– (G)	– (G)	5	4	4
Störkontur	71 %	–	– (G)	– (G)	5	4	6
Zugänglichkeit	79 %	–	0 – 0 (L)	0 (L)	0	0	0
Anmutung	30 %	–	0 – 0 (L)	0 (L)	4	4	5
Festigkeit	48 %	–	4 – 9 (L)	8 (L)	5	9	7
Dichtheit	59 %	–	9 – 9 (L)	9 (L)	5	9	5
Korrosion	61 %	–	9 – 9 (L)	9 (L), 9 (E)	9	9	9
Flanschbreite	38 %	–	3 – 6 (L)	5 (L), 3 (E)	4	5	7
GW	Statischer Gesamtwert (GW)				57,6	54,8	50,9
	Semi-dynamischer Gesamtwert (GW ₊ /GW _–)				67,6/61,1	64,9/63,0	58,6/56,7
	Dynamischer Gesamtwert (GW)				62,0	64,9	57,1
NI	Statischer Nutzwert-Index (NI)				0,63	0,60	0,56
	Semi-dynamischer Nutzwert-Index (NI ₊ /NI _–)				0,74/0,67	0,71/0,69	0,64/0,62
	Dynamischer Nutzwert-Index (NI)				0,68	0,71	0,63

Nachdem die Kennzahlen für die einzelnen Dimensionen ermittelt wurden, ist eine Zusammenführung der Ergebnisse erforderlich. Hierzu erfolgt in der Abbildung 5.4 zuerst die Berechnung der monetären und nicht-monetären Wertigkeit mit den in Kapitel 4.6

eingeführten Präferenzkoeffizienten für die jeweilige Dimension ($p^{KI}=0,6$, $p^{SI}=0,15$ und $p^{NI}=0,25$), die durch den Entscheidungsträger definiert werden. Mit der anschließenden Berechnung des strategischen Leistungs-Indexes (sLI), der im optimalen Fall eins beträgt, kann unter Berücksichtigung aller drei Dimensionen die optimale Handlungsempfehlung ermittelt werden. Während in der statischen und semi-dynamischen Bewertung die FT A die optimale Entscheidung darstellt, kann FT C aufgrund der deutlich höheren monetären Wertigkeit dem Entwickler als optimale Fügetechnologie für die MDK 1 empfohlen werden. Die Verschiebungen in dem Bewertungs-Portfolio in Abbildung 5.4 zeigen, dass durch die fortschreitende Datenverfügbarkeit eine iterative Annäherung bis zur optimalen Lösung stattfindet. Da die Bewertung ausschließlich für die MDK 1 gültig ist, ist analog hierzu eine Bewertung der verbliebenen MDK erforderlich. Die Informationen des Bewertungs-Modells werden anschließend an das Optimierungs-Modell kommuniziert, um die Bewertung von FP- bzw. MDK-Ebene auf die gesamte Baugruppe auszudehnen und somit eine ganzheitlich optimale Lösung zu ermitteln.

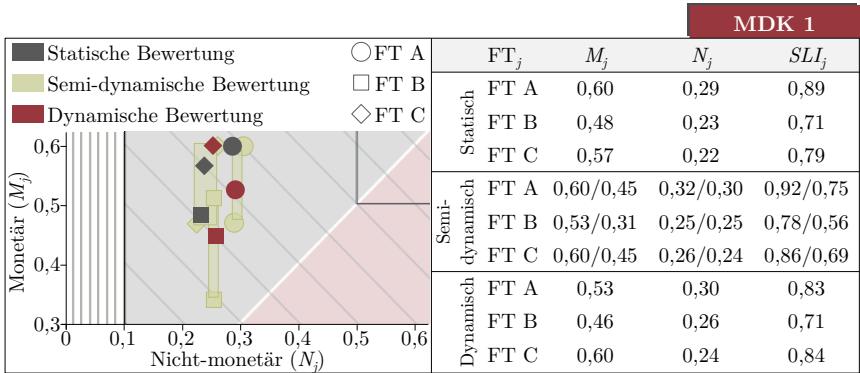


Abbildung 5.4: Zusammenführung der Bewertungsergebnisse der einzelnen Dimensionen mit den Präferenzkoeffizienten $p^{KI}=0,6$, $p^{SI}=0,15$ und $p^{NI}=0,25$

Optimierungs-Modell Mit dem Bewertungs-Modell konnte der monetäre sowie nicht-monetäre Nutzen für jede einzelne MDK quantifiziert werden. Das anschließende Optimierungs-Modell soll basierend auf den ermittelten Daten eine ganzheitlich optimale Lösung für die vollständige Baugruppe aufzeigen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass eine MDK grundsätzlich teilbar ist, d.h. die einer MDK zugeordneten Fügepunkte müssen nicht zwingend gemeinsam gefügt werden. Da dadurch eine optimale Allokation der Fügeverbindungen möglich ist, werden für das Optimierungs-Modell nicht die MDK sondern die dazugehörigen Fügepunkte untersucht. Für die Optimierung erfolgt im ersten Schritt mit der binären Variable q_{jl} eine Zuweisung der Fügetechnologien j in

Fügetechnologie-Gruppen (FTG) l . Die FTG HSN umfasst beispielsweise unterschiedliche Nietgeometrien, die jeweils eine FT darstellen. Im Beispiel der Tabelle 5.9 sind es die FT A.1 und FT A.2, die der FTG A zugeordnet werden können. Bei der FTG B kann ebenfalls auf Basis abweichender Geometrien des Zusatzelements weiter differenziert werden. Bei der FTG C gibt es keine weitere Differenzierung. Daher wird ausschließlich die Technologie FT C der FTG C zugeteilt. Die Matrix aus Tabelle 5.9 weist ein statisches Verhalten auf und ist somit unabhängig vom betrachteten Anwendungsfall.

Tabelle 5.9: Exemplarische Zuordnung der Fügetechnologie j zu der FTG l mit der binären Variable q_{jl}

FTG	FT A.1	FT A.2	FT B.1	FT C
FTG A	1	1	0	0
FTG B	0	0	1	0
FTG C	0	0	0	1

Um die Technologien, die im Screening-Modell keine technologische Realisierbarkeit gewährleisten, ausschließen zu können, wird die binäre Variable a_{ij} eingeführt. Tabelle 5.10 zeigt ausschnittsweise, dass FP 1 nicht mit FT A.1 und FT A.2 gefügt werden kann. Für FP 2 und FP 3 hingegen stehen FT A.2 und FT B.1 nicht zur Auswahl.

Tabelle 5.10: Screening-Modell: Exemplarischer Ausschluss der Fügetechnologie j für Fügpunkt i mit der binären Variable a_{ij}

Fügpunkt	FT A.1	FT A.2	FT B.1	FT C
FP 1	0	0	1	1
FP 2	1	0	0	1
FP 3	1	0	0	1

In dem zweiten Schritt der Auswahlmethodik werden mit der multidimensionalen Bewertung die Eingabewerte des nicht-monetären Indexes N_{ij} berücksichtigt. Diese beschreiben, inwieweit Technologie j für Fügpunkt i aus Sicht der technologischen und ökologischen Dimension geeignet ist. Ein Ausschnitt der Bewertungsergebnisse kann Tabelle 5.11 entnommen werden.

Tabelle 5.11: Exemplarischer Ausschnitt des nicht-monetären Indexes N_{ij} für die einzelnen Fügpunkte

Fügpunkt	FT A.1	FT A.2	FT B.1	FT C
FP 1	0,00	0,00	0,26	0,24
FP 2	0,30	0,00	0,00	0,32
FP 3	0,31	0,00	0,00	0,48

Je größer der Wert, desto geeigneter ist die Technologie für den spezifischen Fügepunkt. Folglich ist für FP 1 die Wahl von FT B.1 optimal. Für FP 2 und FP 3 ist FT C die optimale Lösung. Den im Screening-Modell ausgeschlossenen Fügetechnologien wird der Wert null zugewiesen.

Des Weiteren erfolgt mit den Fügepunkt-Wolken die zeitliche und räumliche Zuordnung der Fügepunkte. Die Zuordnung der Fügepunkte i zu den Fügepunkt-Wolken k erfolgt mit der binären Variable b_{ik} . Wie in Tabelle 5.12 ersichtlich, kann FP 1 ausschließlich der FP-Wolke 2 zugeordnet werden. Das kann bei Fügepunkten der Fall sein, welche an bestimmten Stellen in der Fertigung gesetzt werden müssen, da sie für den Zusammenhalt bzw. für die Fixierung des Bauteils im weiteren Verlauf der Fertigung essentiell sind. FP 2 und FP 3 sind dagegen mehreren FP-Wolken zugeordnet. Somit können die beiden Fügepunkte an unterschiedlichen Stationen gefügt werden und ermöglichen somit eine flexible Zuordnung der Fügepunkte abhängig von der Auslastung der verfügbaren Systeme.

Tabelle 5.12: Exemplarische Zuordnung der Fügepunkte i zu der FP-Wolke k mit der binären Variable b_{ik}

Fügepunkt	Wolke 1	Wolke 2	Wolke 3	Wolke 4
FP 1	0	1	0	0
FP 2	1	1	1	0
FP 3	1	1	0	1

Die Zuordnung der Wolke k zu den Stationen m erfolgt mit der binären Variable e_{km} . Da die Ausmaße des betrachteten Anwendungsfalls eine Erreichbarkeit von allen potentiellen Roboterpositionen ermöglichen, entsprechen die Wolken den Stationen. Folglich besitzen in Tabelle 5.13 ausschließlich Einträge auf der Diagonalen den Wert eins, alle restlichen Positionen weisen den Wert null auf.

Tabelle 5.13: Exemplarische Zuordnung der Fügepunkt-Wolken k zu den Stationen m mit der binären Variable e_{km}

FP-Wolke k	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4
Wolke 1	1	0	0	0
Wolke 2	0	1	0	0
Wolke 3	0	0	1	0

Zusätzlich benötigt die Optimierung als Eingabewerte die maximale Systemanzahl an der Station m sowie die Anzahl der Ein- und Ausspannvorgänge. Da, wie bereits geschildert, in diesem Fall die Wolken auch den Stationen entsprechen, erfolgt in Tabelle 5.14 dahingehend keine weitere Differenzierung. Die maximale Anzahl an Systemen

ist abhängig von den räumlichen Beschränkungen der Produktion. Dagegen hängt die Anzahl der Einspannvorgänge vom zu fügenden Bauteil und dessen Geometrien ab.

Tabelle 5.14: Berücksichtigung der Anzahl an Fügesystemen sowie Einspannvorgängen für die Station m

Prämissen k	Wolke 1	Wolke 2	Wolke 3	Wolke 4	Wolke 5	Wolke 6
Max. Systeme	2	2	6	4	3	2
Einspannvorgänge	1	1	2	2	2	2

Weitere statische Werte stellen die Investitions- und variablen Kosten für ein System der FTG l dar. Zudem sind die Prozesszeiten der einzelnen Technologien j hinterlegt, die jährliche Ausbringungsmenge sowie die Zykluszeit der Fertigung. Tabelle 5.15 zeigt einen exemplarischen Ausschnitt der relevanten Informationen.

Tabelle 5.15: Ausschnitt der Berechnungsgrundlage

Fügetechnologie	Prozesszeit	Investitionskosten	Variable Kosten
FT A.1	2,2 s	270.000 Euro	0,035 Euro/FP
FT A.2	2,1 s	270.000 Euro	0,034 Euro/FP
FT B.1	3,9 s	280.000 Euro	0,061 Euro/FP
FT C	2,7 s	270.000 Euro	0,041 Euro/FP
FT D	1,8 s	300.000 Euro	0,025 Euro/FP
FT E	1,9 s	290.000 Euro	0,051 Euro/FP
FT F	1,6 s	240.000 Euro	0,065 Euro/FP

Das Ergebnis des Optimierungs-Modells liefert abweichende Ergebnisse zu dem ursprünglichen Zustand. Das schematische Anlagenlayout des Soll-Zustands kann der Abbildung 5.5 entnommen werden. Station 1 weist in dem Anlagenlayout des Soll-Zustands im Vergleich zum Ist-Zustand keine Veränderung auf. In Station 2 wird durch die Substitution eines Systems der FT A mit einem FT D-System trotz höherer Investitionskosten von FT D eine höhere Wirtschaftlichkeit erzielt (farblich grün markiert). Der Effekt ist auf die geringeren Prozesszeiten und variablen Kosten der FT D zurückzuführen. Das eine System der FT A in Station 2 muss weiterhin eingesetzt werden, da bei einer MDK Stahl vorhanden ist, die nicht mit FT D gefügt werden kann. Auch bei FT B und FT C ist festzustellen, dass FT C im Vergleich zur FT B geringere Prozesszeiten sowie variable Kosten aufweist. Daher könnten durch Substitution von zwei Systemen der FT B mit zwei Systemen der FT C in Station 3 über Laufzeit hohe Einsparungen erzielt werden (farblich grün markiert).

In Station 4 ist aufgrund der Blechdicke einer MDK die technologische Realisierbarkeit der FT C für zwei Fügepunkte nicht gegeben, weshalb ein System der FT B weiterhin erforderlich ist. Die restlichen bisher mit FT B gesetzten Fügepunkte von Station 4

und 5 können aufgrund der geringeren Prozesszeit von FT C im Vergleich zu FT B durch lediglich zwei Systeme der FT C gesetzt werden (farblich grün markiert), wodurch sich neben den geringeren variablen Kosten eine zusätzliche Einsparung eines gesamten Fügesystems ergibt (farblich rot markiert). Der erzielte *sLI* für diese Lösung beträgt 0,78. Die Lebenszykluskosten in dem Soll-Zustand betragen 4.476.160 Euro, welches einer Ersparnis von 27 Prozent über die Projektlaufzeit entspricht.

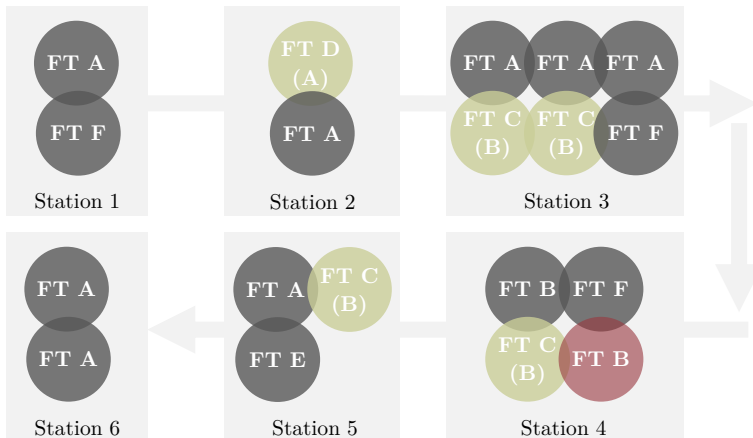


Abbildung 5.5: Schematisches Anlagenlayout des Soll-Zustands (vor Potential-Modell); Erweiterung und Entfall von Systemen farblich grün bzw. rot dargestellt

Potential-Modell Mit dem Optimierungs-Modell konnte unter den gegebenen Prämissen für den untersuchten Anwendungsfall die optimale Lösungsmenge ermittelt werden, die ein Einsparpotential von 27 Prozent verspricht. Mit dem hierauf aufbauenden Potential-Modell wird anschließend geprüft, ob durch Anpassungen hinsichtlich der Konstruktion oder des Werkstoffs zusätzliche Einsparungen erzielt werden können. Ein vielversprechender Ausgangspunkt für die Überprüfung sind die Fügesysteme, die basierend auf der Lösung des Optimierungs-Modells eine geringe Auslastung aufweisen. In diesem Fall trifft dies auf das Fügesystem der FT A von Station 2 zu, welches insgesamt vier Fügepunkte setzt, sowie ein System der FT B in Station 4, welches lediglich zwei Punkte fügt. Die zu fügende MDK in Station 2 besteht aus einem 1,1 mm dicken Aluminium- und einem 1,6 mm dicken Stahlblech. Ein Einsatz der FT D, die einen hohen *sLI* aufweist, ist aufgrund von werkstofforientierten Prämissen, die das Fügen von Mischbauverbindungen verhindern, nicht möglich.⁴

⁴ Die in dem Abschnitt verwendeten Abbildungen des Hinterwagens wurden freundlicherweise seitens der AUDI AG zur Verfügung gestellt.

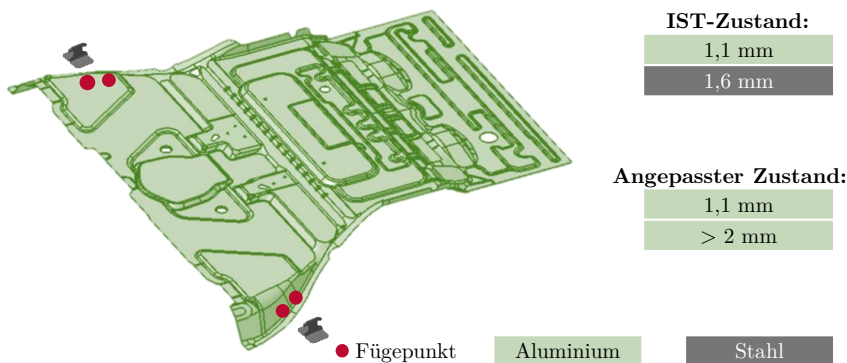


Abbildung 5.6: Anpassung des Anwendungsfalls: Substitution des Stahlblechs mit verstärktem Aluminium

Folglich ist zu prüfen, ob durch Substitution des Stahlblechs mit Aluminium eine Realisierbarkeit der FT D ermöglicht werden kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Aluminium grundsätzlich eine geringere Festigkeit aufweist als Stahl (Ostermann, 2014). Um den Festigkeitsanforderungen zu entsprechen, muss das Aluminiumblech daher eine höhere Dicke aufweisen als das bisher eingesetzte Stahlblech. Im Fall, dass diese Anpassung von der Entwicklung akzeptiert wird, ist eine Einsparung des gesamten Systems der FT A in Station 2 möglich. Abbildung 5.6 zeigt die Lage der Fügepunkte am Bauteil und die MDK im unangepassten sowie im angepassten Zustand.

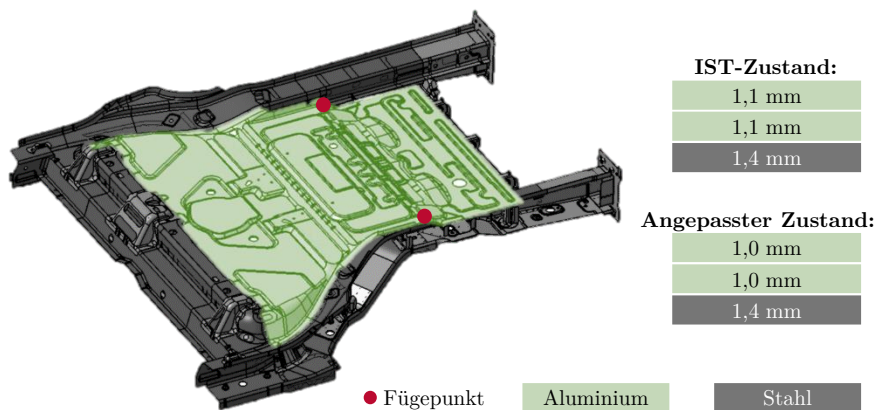


Abbildung 5.7: Anpassung des Anwendungsfalls: Reduzierung der Gesamtblechdicke des Aluminiums

Ein weiteres Füge­system mit einer geringen Auslastung ist das System der FT B in Station 4, welches in einem Zyklus insgesamt zwei Fügepunkte setzt. Dabei handelt es sich um eine 3-Blech-Verbindung aus zwei Aluminium- und einem Stahlblech. Die beiden Aluminiumbleche besitzen eine Dicke von jeweils 1,1 mm, das Stahlblech ist 1,4 mm dick. Ziel ist es, die zwei Fügepunkte auf andere Systeme innerhalb der Station zu verlagern. In Station 4 sind zwei weitere Systeme positioniert, jeweils ein System von FT C und FT F. Da es sich bei FT F um ein linienförmiges Verfahren handelt, ist die Technologie zum Fügen der zwei Fügepunkte von FT B ungeeignet. Bei der FT C ist hingegen laut Kernprämissen für Aluminiumbleche ausschließlich eine maximale Gesamtdicke von 2 mm zulässig. Somit ist die Möglichkeit zu prüfen, die Dicke der beiden Aluminiumbleche auf je 1,0 mm zu reduzieren, wie in Abbildung 5.7 gezeigt. Ist eine Anpassung des Werkstoffs möglich, ist in dem Fall eine Einsparung eines gesamten Systems der FT B in Station 4 möglich, da die zwei Fügepunkte im angepassten Zustand durch das bereits existierende Füge­system der FT C ab Station 4 gesetzt werden könnten.

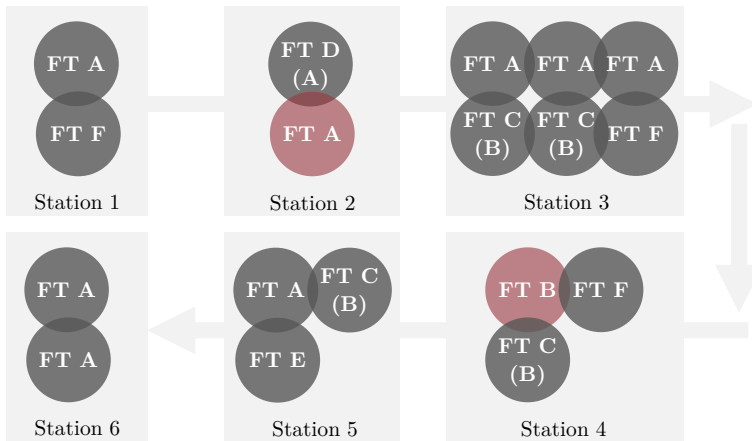


Abbildung 5.8: Schematisches Anlagenlayout des Soll-Zustands (nach Potential-Modell); Entfall von Systemen farblich rot dargestellt

Abbildung 5.8 zeigt das schematische Anlagenlayout nach den Anpassungen des Anwendungsfalls durch das Potential-Modell und dem erneuten Durchlauf der Methodik. Das Ergebnis des Optimierungs-Modells nach der Werkstoffanpassung liefert ähnliche Ergebnisse wie bereits vor Anwendung des Potential-Modells. Jedoch wird durch die werkstofforientierten Anpassungen mit der Einsparung eines Systems in Station 2 sowie Station 4 (farblich rot markiert) weiteres Potential ausgeschöpft. Im Vergleich zu dem Ist-Zustand ist eine Einsparung von insgesamt drei Füge­systemen möglich. Des Weiteren ist durch das Verlegen der vier (FT A zu FT D) bzw. zwei Fügepunkte (FT B zu FT C)

eine weitere Reduzierung der variablen Kosten möglich. Aufgrund der werkstoffspezifischen Anpassungen beträgt der erzielte sLI für die Lösung 0,84. Die Lebenszykluskosten in dem Soll-Zustand nach dem Potential-Modell betragen 4.269.586 Euro, welches im Vergleich zum Ist-Zustand einer Gesamtersparnis von 30 Prozent über die Projektlaufzeit entspricht.

5.1.3 Analyse und Interpretation der Ergebnisse

Nachdem die Vorstellung und Validierung der Auswahlmethodik anhand des Anwendungsfalls abgeschlossen ist, befasst sich folgender Abschnitt mit der Analyse und Interpretation der Ergebnisse. Hierzu liefert Tabelle 5.16 eine Übersicht der eingesetzten Fügesysteme im Ist-Zustand, im Soll-Zustand vor dem Potential-Modell sowie im Soll-Zustand nach der Anpassung des Werkstoffs. Die Berechnungen basieren dabei auf der Annahme, dass die Methodik bereits im Entwicklungsstadium eingesetzt werden konnte.

Tabelle 5.16: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

FT	Ist-Zustand		Soll-Zustand (vor Potential-Modell)		Soll-Zustand (nach Potential-Modell)	
	Systeme	FP	Systeme	FP	Systeme	FP
FT A	9	175	8	141	7	137
FT B	6	88	1	2	0	0
FT C	0	0	4	86	4	88
FT D	0	0	1	34	1	38
FT E	1	7	1	7	1	7
FT F	3	71	3	71	3	71
Summe	19	341	18	341	16	341
sLI	0,59		0,78		0,84	

FT A weist, wie in Tabelle 5.6 aufgezeigt, die geringsten Investitionskosten auf. Dennoch kommt das Optimierungs-Modell zu einem abweichenden Ergebnis. Dieses liefert als optimale Lösung ein System der FT A mit der FT D zu ersetzen. Die Entscheidung ist aufgrund der geringeren variablen Kosten der FT D auf den Degressionseffekt zurückzuführen. Dabei kompensieren die geringeren variablen Kosten bei einer jährlichen Ausbringungsmenge von 80.000 Fahrzeugen und einer Projektlaufzeit von acht Jahren die höheren Investitionskosten. Abbildung 5.9 zeigt den Vergleich der Gesamtkosten von FT A und FT D in Bezug zur Stückzahl. Ab einer Gesamtausbringungsmenge von 400.000 Stück, die nach einer Projektdauer von fünf Jahren erreicht wird, ist FT

D bereits günstiger als FT A (Break Even Point). Ein weiterer Vorteil der FT D ist die geringere Prozesszeit, wodurch eine höhere Anzahl an Fügepunkten innerhalb der Zykluszeit mit dem Fügesystem gefügt werden kann.

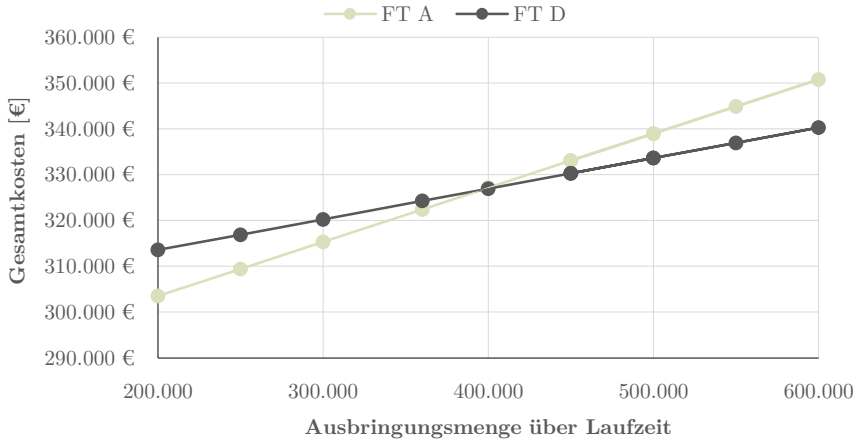


Abbildung 5.9: Kostenentwicklung von FT A und FT D in Abhängigkeit der Gesamtausbringungsmenge: Ermittlung des Break Even Points

Ähnliche Vorteile ergeben sich durch die Substitution der FT B mit FT C. Trotz identischer Investitionskosten weist FT C durch wesentlich geringere variable Kosten eine höhere monetäre Vorteilhaftigkeit auf. Durch die geringere Prozesszeit der FT C können des Weiteren insgesamt ein bzw. zwei Fügesysteme eingespart werden. Da die aktuelle Stückzahl der FT C vergleichsweise gering ist, kommen zusätzliche Erfahrungskurveneffekte stärker zum Tragen. Obwohl FT A und FT B eine teilweise höhere nicht-monetäre Wertigkeit aufweisen, kann bei einer Gleichgewichtung von monetären und nicht-monetären Faktoren, durch die Substitution beider Technologien mit FT D und FT C ein höherer *sLI* erzielt werden.

Folglich geben die Ergebnisse der Methodik dem Entwickler die Empfehlung, zwei Systeme der FT A mit einem System der FT D zu substituieren, nachdem die beschriebene Werkstoffänderung durchgeführt worden ist. Des Weiteren wird eine Substitution der sechs Fügesysteme der FT B mit vier Systemen der FT C empfohlen, nachdem hier ebenfalls die Werkstoffanpassung stattgefunden hat. Die Kosteneinsparung nach Einsatz des Potential-Modells beträgt über Laufzeit 1.863.485 Euro, wodurch 30 Prozent der ursprünglichen Kosten eingespart werden können.⁵

⁵ Für eine detaillierte Übersicht der Fügesysteme sei an dieser Stelle auf den Anhang A verwiesen.

5.2 Prototypische Umsetzung der Methodik in ein Auswahlwerkzeug

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellte und validierte Methodik weist aufgrund der exponentiellen Alternativenauswahl von Fügetechnologien bei größeren Baugruppen eine hohe Komplexität auf. Weiterhin sind für die Bewertung und Optimierung der Handlungsalternativen verschiedene Rechenoperationen erforderlich, die durch einen einfachen Tabellenkalkulator nicht effizient lösbar und daher mit einem hohen Berechnungsaufwand verbunden sind. Um solchen Herausforderungen entgegenzuwirken und die entwickelte Methodik für den industriellen Einsatz zugänglich zu machen, entsteht die Notwendigkeit der Entwicklung eines Auswahlwerkzeugs. Daher wurde im Rahmen des Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner, der Technologieentwicklung der AUDI AG, das Softwarewerkzeug *optimize* entwickelt. Durch die Implementierung der Methodik in *optimize* soll der Anwender im Rahmen der Entscheidungsfindung durch die transparente Daten- und Berechnungsgrundlage unterstützt werden, um konsistente und reproduzierbare Ergebnisse sicherzustellen. Für eine zielorientierte Umsetzung mussten dabei verschiedene Anforderungen berücksichtigt werden. Eine Erläuterung der definierten Anforderungen erfolgt im anschließenden Abschnitt.

5.2.1 Integration des Auswahlwerkzeugs in den Entstehungsprozess

Für die Implementierung des Auswahlwerkzeugs in den Produktentstehungsprozess ist eine Standardisierung der verschiedenen Prozesse der Karosserieentwicklung erforderlich. Hierzu müssen die Verantwortlichkeiten sowie Anforderungen der einzelnen Stakeholder ermittelt werden. Die Identifizierung der Stakeholder erfolgte bereits im Kapitel 3.1, weshalb die Bereiche Entwicklung, Technologieentwicklung sowie die Produkt- und Prozessplanung als primäre Anwender des Auswahlwerkzeugs für Fügetechnologien definiert werden können. Darauf basierend wurde in Anlehnung an eine Anwendererzählung (User Story), einer Methodik zur Spezifizierung von Anforderungen in der Softwareentwicklung, ein schematischer Prozessablauf entwickelt (Patton, Economy & Fowler, 2014). Der Ablauf zeigt die verschiedenen Verantwortlichkeiten und Entscheidungsschritte innerhalb des Auswahlprozesses in der Abbildung 5.10 auf.

Dabei stellt der erste Teil das Screening-Modell dar, welches die technische Realisierbarkeit der Fügetechnologien untersucht und nicht machbare Alternativen für den weiteren Auswahlprozess eliminiert. Da der Entwickler noch keine Informationen über monetäre oder nicht-monetäre Eigenschaften der Fügetechnologien hat, erfolgt im zweiten Schritt mit dem Bewertungs-Modell die Ergänzung der Kennzahl *sLI* für die realisierbaren Fügetechnologien j und FP-Wolken k . Mit diesen Informationen kann der Entwickler für die einzelnen Wolken die optimale Fügetechnologie ermitteln. In diesem Fall sind zum Fügen der einzelnen FP-Wolken drei Fügetechnologien ermittelt worden: FT A, B und C.

Um eine Bewertung für die gesamte Baugruppe zu erhalten, geht der Entwickler auf die Produkt- und Prozessplanung zu, die mit dem Optimierungs-Modell eine ganzheitlich optimale Handlungsempfehlung generiert. Weiterhin wird mit dem Potential-Modell geprüft, ob durch Anpassungen des Werkstoffs oder Produktdesigns zusätzliches Potential ausgeschöpft werden kann. Durch konstruktive Anpassung der FP-Wolke k_4 kann beispielhaft eine Vereinheitlichung der Fügetechnologien realisiert werden, wie in der dritten Matrix in Abildung 5.10 aufgezeigt.

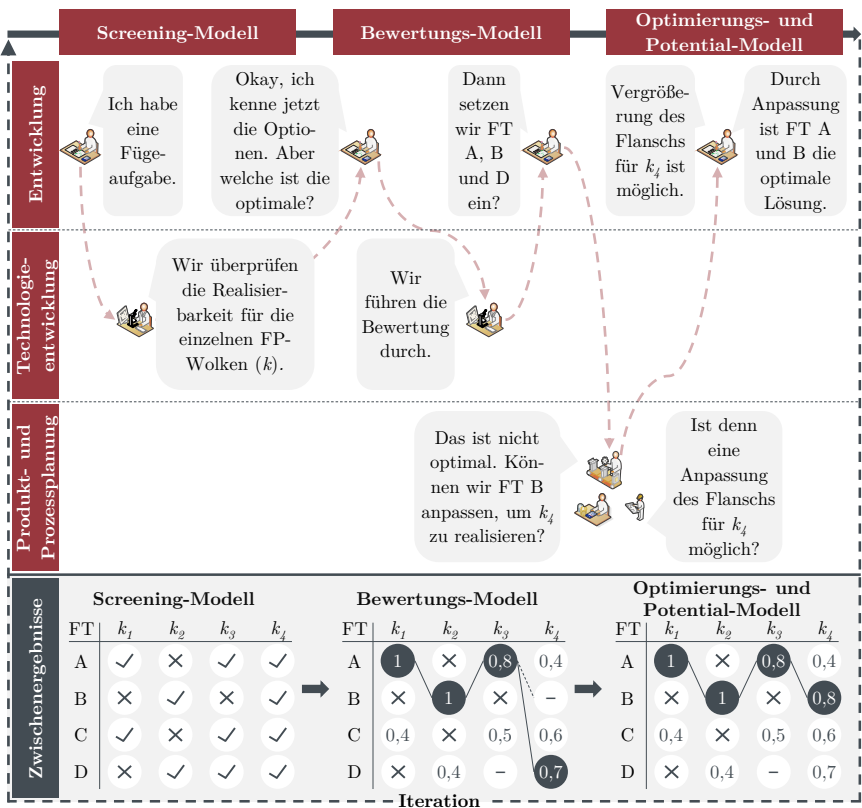


Abbildung 5.10: Schematischer Ablauf der Technologieauswahl

Für die Implementierung des Werkzeugs sind die Anforderungen zu berücksichtigen, die sich aus den unterschiedlichen Verantwortungen ableiten lassen.⁶ Dabei konnte eine wesentliche gemeinsame Anforderung seitens der verschiedenen Rollen identifiziert werden:

⁶ Ein Überblick der Aufgaben und Rechteverteilung ist dem Anhang B zu entnehmen.

Die für die Auswahl erforderlichen Eingangsinformationen (z. B. Werkstoffinformationen oder Anzahl Fügepunkte) sollen über Schnittstellen bestehender IT-Systeme, die in der Karosserieentwicklung und -planung Einsatz finden, automatisiert eingelesen werden. Damit soll eine manuelle Eingabe, die mit einem hohen zeitlichen Personalaufwand und potentiellen Fehleingaben verbunden wäre, unterbunden werden. Zur Berücksichtigung der Anforderung im Rahmen der Werkzeugentwicklung beschäftigt sich folgender Abschnitt mit der Architektur und Gestaltung der Anwendung.

5.2.2 Architektur und Gestaltung des Auswahlwerkzeugs

Um einen praxisnahen Einsatz der Auswahlmethodik zu ermöglichen, wurde im Rahmen des Forschungsprojekts mit der Softwareanwendung *optimize* ein prototypisches Auswahlwerkzeug für die Karosserieentwicklung entwickelt. Das Akronym steht für *optimierte multidimensionale Auswahl von Technologien im Entwicklungsprozess*. Abbildung 5.11 gibt einen Überblick über die Architektur.

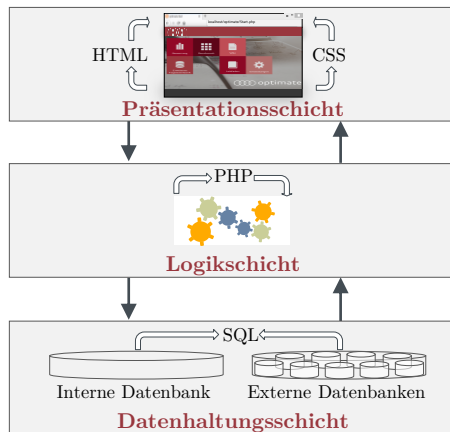


Abbildung 5.11: Architektur des Auswahlwerkzeugs

Mit der Architektur des Schichten-Modells besteht eine hierarchische Abhängigkeit der einzelnen Schichten. Innerhalb der Präsentationsschicht ist das Graphical-User-Interface (GUI) verankert, welches die grafischen Komponenten sowie die Steuerelemente umfasst und somit die Nutzungsoberfläche der Anwendung visualisiert. Die Logikschicht verankert die Implementierung der Auswahlmethodik und umfasst neben den Berechnungsvorschriften das Optimierungsproblem. Mit der Datenhaltungsschicht wird hingegen eine Interaktion mit der Logikschicht ermöglicht, um die erforderlichen Eingangsinformationen für die Auswahl bereitzustellen. Die Informationen sind zum einen in einer internen SQL-

basierten Datenbank abgelegt. Zum anderen existieren bereits verschiedene IT-Systeme wie beispielsweise CAD-Systeme (z. B. CATIA) oder Produktlebenszyklusmanagement-Software (PLM, z. B. Process Designer), die im Karosseriebau für die Produkt- und Prozessplanung sowie für die Fahrzeugentwicklung Einsatz finden und somit externe Datenbanken darstellen. Um die für eine Auswahl erforderlichen Eingangsinformationen automatisiert einlesen zu können, müssen daher Schnittstellen zu den verschiedenen externen Datenquellen definiert werden.

Für die Umsetzung der Realisierungsvorgaben hinsichtlich Struktur und Erscheinungsbild der Benutzungsoberfläche ist ein Styleguide erstellt worden, der beispielsweise die anzuwendende Farbkodierung, Vorgaben zur Typographie oder Bildsprache definiert. Um eine bedienerfreundliche Anwendung zu ermöglichen, wurde im Rahmen des Styleguides der Flat Design-Stil festgelegt, der sich durch seine Simplizität auszeichnet.

Für die Startseite wurde eine Bedienoberfläche in Kachelform gewählt. Die quadratischen Kacheln zeigen die verschiedenen Funktionen der Anwendung auf. Während die *Technologieauswahl* die eigentliche Auswahlmethodik beinhaltet, kann im *Benchmark* ein direkter Vergleich zwischen verschiedenen Technologien oder Lösungskombinationen durchgeführt werden kann. Das *Wiki* verwaltet die verschiedenen Kataloge, wie beispielsweise den Konstruktions- oder Werkstoffkatalog. Der *Leitfaden* dient als Handbuch der Anwendung. In den *Einstellungen* können Anpassungen und Aktualisierungen vorgenommen werden. Abbildung 5.12 zeigt die Startseite von *optimize* mit den einzelnen Funktionen auf.

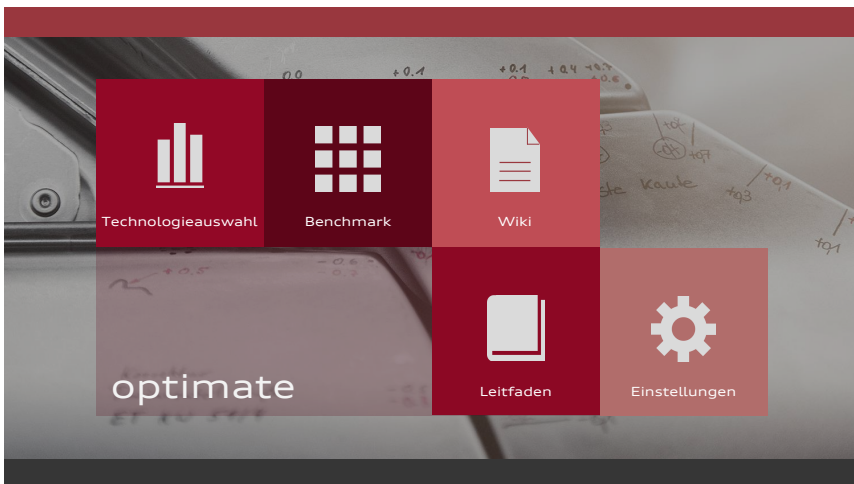


Abbildung 5.12: Startseite des Auswahlwerkzeugs: Überblick der einzelnen Funktionen von *optimize*

Die Funktion *Technologieauswahl*, die das Screening-, Bewertungs-, Optimierungs- und Potential-Modell umfasst, bildet den gesamten Auswahlprozess von Fügetechnologien ab. Daher wird die Beschreibung von *optimate* im Rahmen dieser Arbeit auf die *Technologieauswahl* begrenzt. Für die Durchführung der *Technologieauswahl* ist die Eingabe von Projekt-, Prozess- sowie Produktdaten erforderlich, bei der zwischen ökonomischen, ökologischen sowie technologischen Faktoren unterschieden wird. Die Datenbefüllung kann entweder manuell oder über die in Abbildung 5.11 beschriebenen Schnittstellen erfolgen. Sollten zu dem Zeitpunkt keine Daten verfügbar sein, erfolgt eine statische Bewertung ohne Bezug auf eine Baugruppe. Im Fall, dass die erforderlichen Daten bereits teilweise vorliegen, greift die semi-dynamische Bewertung. Sobald eine vollständige Dateneingabe vorliegt, findet die dynamische Bewertung statt. Für eine transparente Ergebnisdarstellung ist daher eine Fortschrittsanzeige angebracht worden, welche den jeweiligen Datenbefüllungsgrad prozentual in Form eines Barometers aufzeigt.

Zu Beginn des Auswahlprozesses ist im Rahmen der ökonomischen und ökologischen Bewertung die Eintragung der Projekt- und Baugruppennummer erforderlich, um die für die Berechnung benötigten Daten über Schnittstellen einlesen zu können. Alternativ kann ein neues Projekt angelegt werden, um eine manuelle Eintragung der Daten vorzunehmen. Weiterhin wird über die Baugruppennummer die Anzahl an Fügepunkten bzw. die jährliche Ausbringungsmenge eingelesen. Zu den Prozessdaten gehören neben der Angabe der Takt- und Nebenzeiten insbesondere Informationen bzgl. bereits vorhandener Fügesysteme, die im Rahmen der Investitions- und Ressourcenermittlung relevant sind.

optimate

Ökonomie und Ökologie
 Projektdaten hinzufügen

☒ Vorhandenes Projekt AU651 Land Deutschland Stand im PEP PP (-47 bis -44)

☐ Neues Projekt ... Standort Neckarsulm

Baugruppen-Nr. 4M0_800_738 Baugruppen/Fahrzeug 1 Fügepunkte/Baugruppe 20 Fahrzeuge/Jahr 52.800

Prozessdaten hinzufügen

Prozesszeit in Sekunden (Taktzeit - Nebenzeit)
 0 130 250 ☐ Kalkulatorische Prozesszeit nutzen

Anordnung und Kapazitätsauslastung vorhandener Fügesysteme

Station 1: Clinchen 50%, RES 40%, WPS 43%

Station 2: Laser 35%, Kleben 100%, HSN 20%

+ Station/Fügesystem hinzufügen
 ⌘ Anordnung/Kapazität anpassen

12% FORTSCHRITT

Abbildung 5.13: Ausschnitt der Eingabemaske von *optimate* für ökonomische und ökologische Einflussfaktoren

Falls noch einzelne Systeme über freie Kapazitäten verfügen, können diese gegebenenfalls für eine Integration der betrachteten Baugruppe genutzt werden. Somit erfolgt in diesem Schritt die Abbildung der Fügeysteme innerhalb der Stationen. Abbildung 5.13 zeigt einen für die ökonomische und ökologische Bewertung relevanten Ausschnitt des Auswahlwerkzeugs zur Eingabe der Projekt- und Prozessdaten.

Für die technologische Bewertung sowie den vorgelagerten Screening-Prozess sind Werkstoff- und Konstruktionsdaten erforderlich. Analog zu der ökonomischen oder ökologischen Bewertung ist das Einlesen der Daten über die definierten Schnittstellen oder über eine manuelle Eingabe möglich. Im ersten Schritt werden für den Bewertungsprozess die einzusetzenden MDK, wie in Abbildung 5.14 dargestellt, benötigt. Die MDK bestehen in der Regel aus maximal drei Werkstoffen, welche durch die konkrete Bezeichnung, Oberfläche sowie Dicke spezifiziert werden. Da insbesondere die Werkstoffdicke im Rahmen des Entwicklungsprozesses eine Variable darstellt, kann für das Attribut neben einem exakten Wert auch eine Spanne (z. B. von 1,3 mm - 1,4 mm) angegeben werden. Des Weiteren kann in diesem Schritt der Klebstoffbedarf sowie die Art und Position des Klebstoffs festgelegt werden.

Technologie

Werkstoff hinzufügen

MDK1

Werkstofffarbe: Hochfester Stahl (kalt)

Werkstoff: CR180BH-EG [HC180B]

Oberfläche: EG

Werkstoffdicke [mm]: 0,5 - 1,3 - 1,4 - 4,0

MDK2

Werkstofffarbe: Alu (Guss)

Werkstoff: TL117A (AlSi9MgMn)

Oberfläche: TLB2427 (gewaschen)

Werkstoffdicke [mm]: 0,5 - 1,3 - 1,5 - 4,0

MDK3

Werkstofffarbe: Hochfester Stahl (kalt)

Werkstoff: CR180BH-EG [HC180B]

Oberfläche: EG

Werkstoffdicke [mm]: 0,5 - 1,3 - 1,4 - 4,0

Klebstoff erforderlich? ☒ Ja ☐ Nein ☒ AMV 169 320

Position ☒ Zwischen 1 und 2 ☐ Zwischen 2 und 3

+ MDK 2 hinzufügen

Anforderungen hinzufügen

Dichtheit ☐ Erfordernis ☒ Erfordernis

Korrosionsbeständigkeit ☒ Erfordernis

Quasistatische Festigkeit ☐ Gering ☒ Mittel ☒ Hoch

Klassenprofil ☒ Trockenbereich ☐ Nassbereich ☐ Anbaufeld

Flanscbreite hinzufügen

Fügestellen spezifizieren

Fügestellen abbilden

37% FORTSCHRITT

Abbildung 5.14: Ausschnitt der Eingabemaske von *optimate* für technologische Einflussfaktoren

Mit der Angabe der MDK können die zu setzenden Fügestellen weiter spezifiziert werden. Die Spezifizierung umfasst Angaben wie beispielsweise die Fügerichtung oder Flanscbreite. Anschließend werden die technologischen Anforderungen an das Bauteil definiert. Beispielsweise wird bei der lokalen Anforderung Dichtheit oder Korrosionsbeständigkeit

die Notwendigkeit der Baugruppe festgelegt. Bei der Festigkeit kann in drei Stufen zwischen gering, mittel und hoch differenziert werden. Die Wunschlösung wird dabei mit einem Häkchen ausgewählt, durch zweimaliges Klicken erscheint ein Häkchen in Klammern, welches eine gerade noch akzeptable Lösung darstellt. Eine Lösungsmenge mit dieser Eigenschaft wird im Ergebnis noch angezeigt, durch die Straffunktion fällt die Bewertung allerdings schlechter aus. Ist kein Häkchen gesetzt, fallen alle Technologien dieser Option aus der Lösungsmenge heraus. In dem Beispiel in Abbildung 5.14 sollen beispielsweise keine Technologien mit einer geringen Festigkeit berücksichtigt werden. Technologien mit einer mittleren Festigkeit werden abgestraft und Technologien mit einer hohen Festigkeit stellen die Wunschlösung dar. Als Klassenprofile stehen unterschiedliche Fahrzeugbereiche zur Auswahl. Die Selektion des Klassenprofils wirkt sich bei der technologischen Bewertung auf die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien aus. Beispielsweise sind die Kriterien Korrosionsbeständigkeit und Dichtheit im Klassenprofil Nassbereich höher gewichtet als im Trockenbereich. Der letzte Schritt der Eingabemaske für die technologischen Kriterien legt die konstruktionsbedingte Fügefolge fest. In diesem Schritt wird beispielsweise festgelegt, dass bestimmte Fügepunkte zuerst als Fixierpunkte gesetzt werden müssen, bevor die restlichen Punkte gefügt werden können.

Nach der Eingabe der Daten erfolgt die Bewertung der realisierbaren Fügetechnologien. Hierzu werden die Ergebnisse der Alternativen in dem im Kapitel 4.5 vorgestellten Bewertungsportfolio eingeordnet sowie tabellarisch aufgelistet. Je dunkler die Einfärbung der Lösungsmenge, desto besser ist der Gesamtindex *sLI*. Insbesondere bei größeren Baugruppen tritt der Fall auf, dass die optimale Lösungsmenge nicht aus einer, sondern aus einer Kombination mehrerer Fügetechnologien besteht. Jede Zeile der Tabelle ist wie in Abbildung 5.15 erweiterbar. In der Detailansicht besteht die Möglichkeit, die optimalen Fügetechnologien sowie deren *sLI* für die einzelnen FP-Wolken *k* einzusehen.

Um weitere Optimierungen vornehmen zu können, welche aufgrund einer konstruktions- oder werkstoffspezifischen Kernprämisse nicht realisierbar sind, kann basierend auf dem Ergebnis der Bewertung eine Potentialanalyse durchgeführt werden. Hierzu werden die FP-Wolken, welche im Rahmen der technologischen Bewertung ausgeschlossen wurden und daher mit einem “–” gekennzeichnet sind, auf mögliche Anpassungen hinsichtlich der Konstruktion oder des Werkstoffs geprüft, um eine Realisierbarkeit der Fügetechnologie zu ermöglichen. Hierzu wird durch das Anklicken der zu untersuchenden FP-Wolke eine Erklärung angezeigt, warum der Fügepunkt mit dieser Technologie nicht realisiert werden kann. Gleichzeitig erscheint ein Vorschlagskatalog mit Optimierungsmöglichkeiten, die ergriffen werden können. Die Vorschläge können, wie der untere Teil der Abbildung 5.15 darstellt, konstruktive Maßnahmen sein oder Vorschläge für Werkstoffe, welche ähnliche Eigenschaften wie der zu substituierende Werkstoff haben, aber nicht gegen die Prämisse verstoßen. Falls eine dieser Maßnahmen für den Entwickler umsetzbar ist, kann basierend auf der angepassten Fügeaufgabe eine erneute Bewertung durchgeführt werden. Somit ist die Entscheidungsfindung abgeschlossen.

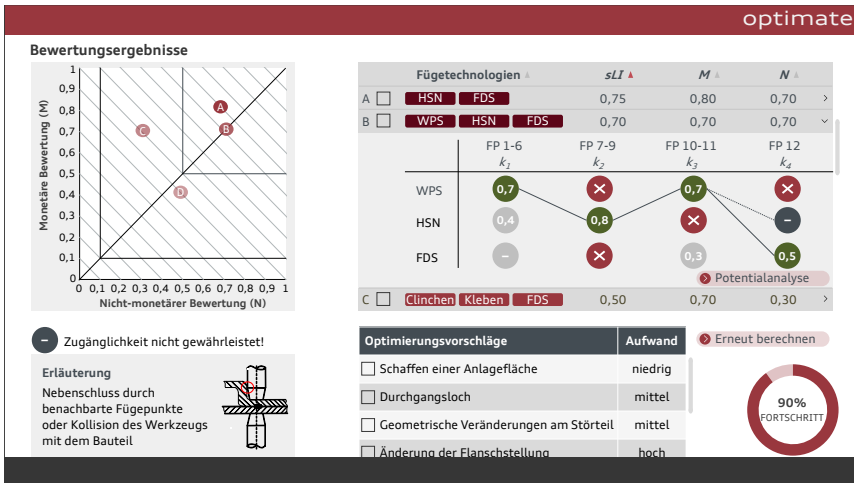


Abbildung 5.15: Ausschnitt der Ausgabemaske von *optimate* zur Darstellung der Bewertungsergebnisse und Durchführung der Potentialanalyse

5.3 Zwischenfazit: Bewertung und Diskussion des entwickelten Konzepts

In dem folgenden Abschnitt erfolgt eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse im Rahmen der Validierung der Forschung, bevor eine Bewertung und kritische Reflexion der entwickelten Auswahlmethodik hinsichtlich der Erfüllung der in Kapitel 2 und 3 identifizierten Anforderungen erfolgt. Hierzu werden neben den gewonnenen Erfahrungen aus dem Validierungsbeispiel anhand des Hinterwagens auch die Erkenntnisse weiterer Anwendungsfälle aus dem Automobilbau herangezogen.

Zusammenfassung des Kapitels: Das fünfte Kapitel befasste sich mit der Integration und Validierung der Auswahlmethodik anhand einer exemplarischen Baugruppe. Hierzu wurde mit dem Hinterboden ein Anwendungsfall aus dem Karosseriebau herangezogen. Zu Beginn wurden durch einen Abgleich der Kernprämissen und der Anforderungen der Fügeaufgabe in dem Screening-Modell die Alternativen eliminiert, welche keine technologische Realisierbarkeit aufweisen konnten. Im folgenden Bewertungs-Modell wurde exemplarisch für eine MDK die multidimensionale Bewertung zur Berechnung der ökonomischen, ökologischen und technologischen Kennzahl vorgestellt. In diesem Kontext wurde auch auf die unterschiedlichen Ergebnisse der statischen, semi-dynamischen sowie dynamischen Bewertung eingegangen. Durch die Konsolidierung der Kennzahlen der drei Dimensionen wurde der *sLI* ermittelt, auf dessen Basis eine Handlungsempfehlung

für die untersuchte MDK abgegeben werden konnte. Die Aufgabe des anschließenden Optimierungs-Modells war die Ermittlung der optimalen Lösung für die gesamte Baugruppe. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass durch die optimierte Entscheidungsfindung über Laufzeit eine Kosteneinsparung von 27 Prozent erzielt werden konnte. Hierzu erfolgte die Substitution von zwei Technologien, die eine vergleichsweise hohe nicht-monetäre Vorteilhaftigkeit aufweisen konnten, jedoch aufgrund des hohen Anteils an variablen Kosten für die Fügeaufgabe insgesamt über einen geringeren *sLI* verfügten. Durch werkstoff- und konstruktionsspezifische Anpassungen konnten im letzten Schritt der Auswahlmethodik mit dem Potential-Modell weitere Einsparungen in Höhe von insgesamt 30 Prozent im Vergleich zum unoptimierten Zustand durch Vereinheitlichung von Fügetechnologien aufgezeigt werden. Zur Integration des Auswahlprozesses in den Produktentstehungsprozess wurde abschließend das prototypische Softwarewerkzeug *optimize* vorgestellt, welches durch eine Automatisierung der Rechenoperationen sowie vernetzter IT-Schnittstellen die Akzeptanz der Auswahlmethodik im automobilen Karosseriebau sicherstellen soll.

Erfüllung der Anforderungen zur Bewertung und Auswahl der Fügetechnik: Die Auswahlmethodik wurde unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 identifizierten Anforderungen konzipiert. Die Anforderungen konnten im Rahmen der Entwicklung, wie folgt beschrieben, vollständig erfüllt werden:

Transparenz:	Durch die einheitliche Definition von Systemgrenzen und standardisierte Berechnungsgrundlage sowie durch den modularen Aufbau der Auswahlmethodik wird eine transparente Basis zum Vergleich von Fügetechnologien ermöglicht.
Generische Anwendbarkeit:	Durch die allgemeingültige Berechnungsgrundlage wird eine Bewertung unterschiedlicher Baugruppen einer Karosserie sichergestellt. Die Methodik ist auf einer Abstraktionsebene modelliert, welche die Berücksichtigung aller sowie bei Bedarf das Ein- oder Ausblenden einzelner bauteilspezifischer Anforderungen zulässt.
Skalierbarkeit:	Die Methodik basiert für das Screening-, Bewertungs-, Optimierungs- und Potential-Modell auf vier jeweils unabhängigen Datenbanken, um eine flexible Erweiterung bzw. Modifikation der Methodik zu gewährleisten.
Frühzeitige Anwendung:	Um eine Bewertung zu jedem Zeitpunkt zu ermöglichen, wurde eine Methodik mit adaptiver Gestalt konzipiert, die sich durch einen mehrstufigen Aufbau kennzeichnet. Dabei steigt mit zunehmender Datenverfügbarkeit sowie abnehmender Unsicherheit die Genauigkeit der Bewertung im Verlauf des PEP.

Praxis-tauglichkeit:	Für die Berechnungsgrundlage sind neue Datenbanken aufgebaut worden, welche die bestehenden Daten der Karosserieentwicklung automatisiert über Schnittstellen abrufen und für die weitere Kalkulation verarbeiten. Somit ist keine aufwändige Dateneingabe erforderlich. Des Weiteren ist für ein automatisiertes Durchführen der verschiedenen Rechenoperationen das auf der Methodik basierende Softwarewerkzeug <i>optimate</i> entwickelt worden, welches den Anwender durch die verschiedenen Prozessschritte leitet.
Effizienz:	Um einen effizienten Auswahlprozess zu ermöglichen, wurde das Screening-Modell entwickelt. Dadurch werden nur Technologien für die einzelnen Fügeaufgaben berücksichtigt, die technologisch realisierbar sind.
Multi-dimensionale Bewertung:	Zur Berücksichtigung der Dimensionen <i>Ökonomie</i> , <i>Ökologie</i> und <i>Technologie</i> wurde basierend auf den in Kapitel 2.3 abgeleiteten Anforderungen, wie beispielsweise der Berücksichtigung von ökonomischen Unsicherheiten, der Integration einer Wirkungsabschätzung für die Umweltbewertung oder der Gewichtung technologischer Kriterien, das Bewertungs-Modell entwickelt.
Ganzheitliche Bewertung:	Für die Ermittlung einer ganzheitlich optimalen Lösungsmenge auf Baugruppenebene wurde das Optimierungs-Modell entwickelt.
Werkstoff-/konstruktions-spezifische Potentiale:	Zur Berücksichtigung der Korrelationen zwischen Füge-technik und Werkstoff sowie Konstruktion wurde die Methodik durch das auf dem Werkstoff- und Konstruktionskatalog basierende Potential-Modell ergänzt, welches durch Anpassungen des Werkstoffs oder der Konstruktion weiteres Optimierungspotential liefert.

Nutzen der Auswahlmethodik: Der Mehrwert der Auswahlmethodik für den Karosseriebau ist vielfältig. Das primäre Ziel der Methodik ist die Transparenz der Füge-technologien hinsichtlich ökonomischer, ökologischer sowie technologischer Kriterien. Durch die Transparenz kann folglich eine optimierte und effiziente Entscheidungsfindung ermöglicht werden. Mit dem multidimensionalen Bewertungsansatz soll insbesondere vermieden werden, sich bei der Auswahl der optimalen Füge-technologie ausschließlich auf den ökonomischen Einfluss (z. B. Investitionskosten) zu konzentrieren.

Abhängig von den Unternehmenspräferenzen stellt beispielsweise bei einer kostenorientierten Strategie die Reduzierung der Lebenszykluskosten einer Fügeanlage den wesentlichen Nutzen dar. Durch die Validierung der Methodik mit dem Anwendungsfall sowie weiterer im Rahmen der Forschung untersuchter Projektbeispiele konnte festgestellt werden, dass die resultierende Kosteneinsparung eine hohe Varianz aufweist und somit keine pauscha-

len Einsparwerte herangezogen werden können; bei den untersuchten Anwendungsfällen lag der Einsparfaktor zwischen 0 und 31 Prozent über Projektlaufzeit.

Das primäre Ziel eines umweltorientierten Unternehmens hingegen ist die Erhöhung der Ressourceneffizienz innerhalb der Fertigung. Mit dem Auswahlwerkzeug *optimize* können beispielsweise durch die verschiedenen Analysemöglichkeiten die einzelnen Ressourcenströme quantifiziert werden, um verbrauchsintensive Fügetechnologien zu identifizieren. Durch die ressourceneffizienteren Fügeprozesse können neben den ökonomischen Vorteilen auch weitere positive Entwicklungen abgeleitet werden, wie beispielsweise eine umweltbewusstere Unternehmensreputation zu Marketingzwecken.

Bei einer technologieorientierten Unternehmensstrategie steht die Qualität im Vordergrund. Die technologische Bewertung, die eine Evaluierung der Fügetechnologien hinsichtlich relevanter technologischer Kriterien samt Gewichtungsfaktoren bereitstellt, ermöglicht daher eine transparente Vergleichsgrundlage, um neben den Kosten- oder Umweltaspekten auch den nicht-monetären Nutzen einer Fügetechnologie mit zu berücksichtigen. Ziel der technologischen Bewertung ist es somit, eine vergleichende Antwort darauf geben zu können, inwiefern die technologischen Anforderungen zur Lösung der Fügeaufgabe erfüllt werden.

Bei der Entscheidungsfindung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die einzelnen Zielgrößen der Dimensionen nicht immer korrelieren. Beispielsweise muss die ökologisch vorteilhafteste Fügetechnologie nicht zwingend auch die ökonomisch oder technologisch vorteilhafteste Alternative darstellen, da es sich hierbei um konfligierende Zielgrößen handeln kann. Insbesondere für solche Szenarien wurden die Präferenzkoeffizienten integriert, die unter Berücksichtigung der Unternehmenspräferenzen die optimale Fügetechnologie ermitteln.



Zusammenfassung und Ausblick

In dem abschließenden Kapitel wird die Problematik einer fehlenden methodischen Auswahl von Füge Technologien sowie das grundsätzliche Vorgehen der Arbeit zur Lösung der dargestellten Problematik zusammengefasst. Ergänzend hierzu werden in dem Ausblick der weitere Forschungsbedarf zur Erweiterung und Optimierung der Auswahlmethodik diskutiert.

6.1 Zusammenfassung

Der langfristige Erfolg eines produzierenden Unternehmens in einem global wachsenden Wettbewerb basiert auf einer kostenoptimierten, ressourceneffizienten sowie qualitätsorientierten Fertigung. Diese Zielgrößen lassen sich den drei Dimensionen *Ökonomie*, *Ökologie* und *Technologie* zuordnen, die ein multidimensionales Bewertungsproblem darstellen. Projiziert auf die Automobilbranche, die vor zunehmend komplexeren Herausforderungen steht, lässt sich das Bewertungsproblem wie folgt beschreiben: Die Kosten für die Entwicklung und Produktion sollen bei gleichzeitig strengeren Umweltvorschriften für nachhaltigere Produkte und Prozesse sowie steigenden Qualitätsanforderungen optimiert werden. Der Trend zum Karosserieleichtbau ist dabei ein vielversprechender Lösungsweg, resultiert jedoch in eine wachsende Vielfalt an individuellen Werkstoffkombinationen, welche wiederum zu einer steigenden Diversität der Fügetechnik führt. Vor diesem Hintergrund ist eine transparente Entscheidungsfindung der Fügetechnik unter Berücksichtigung monetärer sowie nicht-monetärer Faktoren erforderlich. Allerdings erfolgt die Auswahl aktuell zumeist basierend auf der jeweiligen Expertise eines Entwicklers; ein standardisiertes Vorgehen zur Bewertung und Auswahl der Fügetechnik existiert nicht. Ziel der Forschung war es daher, ein methodisches Vorgehen zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Fügetechnologien zu entwickeln, um eine optimierte Entscheidungsfindung im Rahmen des Produktentstehungsprozesses einer Karosserie herbeizuführen.

Innerhalb der Literaturrecherche zur Untersuchung des Stands der Wissenschaft wurde aufgezeigt, dass im Hinblick auf eine multidimensionale Auswahl bereits eine Vielzahl an Bewertungsansätzen existiert, die eine ökonomische, ökologische oder technologische Bewertung von Fügetechnologien im Karosseriebau ermöglichen. Durch die aus einer Stakeholder-Analyse ermittelten Anforderungen wurde ein Abgleich mit den bestehenden Ansätzen mit der Erkenntnis durchgeführt, dass keiner der theoretischen Ansätze eine anforderungsgerechte Bewertung von Fügetechnologien zugelassen hat. Die Ansätze haben sich entweder auf einzelne Dimensionen beschränkt oder waren auf sehr spezifische Anwendungsfälle zugeschnitten, weshalb keine generische Anwendung der Methodik gewährleistet werden konnte. Basierend auf den Defiziten leitete sich der Handlungsbedarf zur Entwicklung einer multidimensionalen Auswahlmethodik für Fügetechnologien ab.

Die folgende Konzeptionierung der Auswahlmethodik erfolgte motiviert durch die Defizite der bestehenden Forschungsansätze für den spezifischen Bereich der Karosserieentwicklung. Hierzu wurde zunächst eine Eingrenzung des Forschungsbereichs vorgenommen. Darauf basierend konnten die grundlegenden Anforderungen an eine Auswahlmethodik abgeleitet werden, die für die anschließende Methodenentwicklung zu berücksichtigenden waren. Der grundsätzliche Aufbau der Auswahlmethodik setzt sich dabei mit dem Screening-, Bewertungs-, Optimierungs- sowie Potential-Modell aus vier, iterativ aufeinander folgenden Komponenten zusammen. Während das Screening-Modell eine effi-

zientere Auswahl durch das ausschließliche Berücksichtigen von Alternativen ermöglicht, die eine technologische Realisierbarkeit gewährleisten, erfolgt im Bewertungs-Modell eine multidimensionale Bewertung der Fügetechnologien auf Fügepunkt-Ebene, bei der neben ökonomischen auch ökologische sowie technologische Faktoren berücksichtigt werden. Die dritte Komponente der Auswahlmethodik, das Optimierungs-Modell, führt die drei Dimensionen des Bewertungs-Modells in den strategischen Leistungs-Index sLI_{ij} zusammen, um eine optimale Lösung auf Baugruppenebene zu ermitteln. Das abschließende Potential-Modell untersucht für eine ganzheitliche Berücksichtigung zusätzlich die Korrelationen zwischen Fügetechnologie, Werkstoff und Konstruktion. Dabei sollen durch Anpassungen, bestehende werkstoff- oder konstruktionsspezifische Restriktionen von Fügetechnologien für einzelne Fügeaufgaben eliminiert werden, um zusätzliche Potentiale auszuschöpfen. Damit ein Einsatz der Methodik zu jedem Zeitpunkt des Produktentstehungsprozesses möglich ist, wurde eine adaptive mehrstufige Bewertungsmethodik entwickelt.

Für die Validierung der Methodik wurde ein Fahrzeug-Hinterboden als exemplarischer Anwendungsfall herangezogen. Dabei wurde aufgezeigt, dass durch die optimierte Entscheidungsfindung eine Kosteneinsparung von 27 Prozent über die Projektlaufzeit erzielt werden konnte. Des Weiteren wurden durch werkstoff- und konstruktionsspezifische Anpassungen im letzten Schritt der Auswahlmethodik mit dem Potential-Modell weitere Einsparungen in Höhe von insgesamt 30 Prozent im Vergleich zum unoptimierten Zustand durch die Vereinheitlichung der Fügetechnologien erzielt. Die Umsetzung des Auswahlprozesses in den Produktentstehungsprozess wurde abschließend das prototypische Softwarewerkzeugs *optimate* vorgestellt, um durch eine Automatisierung der Rechenoperationen sowie vernetzter IT-Schnittstellen einen effizienten Einsatz sowie die Akzeptanz der Auswahlmethodik im automobilen Karosseriebau zu erhalten. Abschließend erfolgte eine kritische Bewertung der Forschung, in der die initial gestellten Anforderungen vollständig erfüllt werden konnten.

6.2 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Auswahlmethodik kann als Basis für weiterführende Forschungsaktivitäten auf dem Themengebiet herangezogen werden. Im Hinblick auf die Anwendung der Methodik ist die Entwicklung eines einheitlichen Bewertungskonzepts ein wesentlicher Schritt für die Zukunft, um die ökonomische, ökologische sowie technologische Wertigkeit eines Fahrzeugprojekts basierend auf den entwickelten Kennzahlen abzuleiten. Dadurch kann für die Bewertung der Fügetechnologien ein standardisierter Benchmark verschiedener Fahrzeugprojekte, intern sowie extern, sichergestellt werden.

Des Weiteren besteht Handlungsbedarf für das Potential-Modell. Aktuell ist zur Ermöglichung einer spezifischen Fügeaufgabe eine manuelle Suche des Entwicklers erforderlich,

um nachträglich adäquate Maßnahmen zur werkstoff- oder konstruktionsspezifischen Anpassung vorzunehmen. Eine Möglichkeit zur Reduktion des Aufwands ist die Ergänzung der bereits bestehenden Wissensdatenbanken mit entsprechenden Such-Algorithmen. Da in dem Fall Werkstoff und Konstruktionsprämissen bereits definiert sind, besteht jedoch begrenztes Anpassungspotential. Eine integrierte und komponentenübergreifende Auswahl von Werkstoff, Konstruktion und Fügetechnologie in Anlehnung an den allgemeinen Ansatz von Kaspar und Vielhaber (2016) könnte dem entgegenwirken, da im Rahmen der Entscheidungsfindung die Prämissen der einzelnen Komponenten zeitgleich berücksichtigt werden könnten.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ist die Berücksichtigung der Festigkeit einer Fügeverbindung zur Festlegung der Anzahl an Fügepunkten. Aktuell wird unabhängig von der Festigkeit eine einheitliche Anzahl an Fügepunkten angenommen. Jedoch ist es durch die Substitution einer Fügetechnologie möglich, dass eine höhere oder geringere Festigkeit der einzelnen Fügeverbindung erzielt wird. Dementsprechend ist zum Erreichen von äquivalenten Festigkeitseigenschaften von möglichen Baugruppen eine abweichende Anzahl an Fügepunkten zu setzen.

Ein Ansatz für weitere Forschungsarbeiten stellt die Erweiterung der Anlagenkonfigurationen zur Unterstützung der Anlagenauslegung dar, um unterschiedliche Anlagenkonzepte (z. B. Mehr-Magazin-Systeme oder Docking-Stationen) mit zu berücksichtigen. Dies ist beispielsweise durch eine entsprechende Erweiterung der Wissensdatenbank realisierbar. Weiterhin ist zu prüfen, ob eine Berücksichtigung der Verfahrenwege von den einzelnen Systemen möglich ist, um ein Kollidieren der Verfahrenwege von den Systemen zu verhindern.

Die Arbeit fokussiert sich auf die Auswahl von Fügetechnologien in der Karosserieentwicklung. Jedoch ist das Konzept der Methodik darauf ausgelegt, durch Erweiterung der Wissensdatenbanken auch zukünftig für andere Gewerke (z. B. Montage) oder Industriebereiche (z. B. Schiffbau) einen Einsatz zu ermöglichen. Hierfür ist durch zukünftige Studien die Eignung der Methodik für weitere potentielle Anwendungsbereiche zu validieren.

Literaturverzeichnis

- Abele, E. & Reinhart, G. (2011). *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. doi:10.3139/9783446428058
- Ahnert, M., Hübner, M., Riedel, F. & Neugebauer, R. (2013). *Methoden zur Bewertung der Energie- und Ressourceneffizienz von Füge Technologien. Innovationsallianz. Green Carbody Technologies - InnoCaT: Forschung für die Energie- und Ressourceneffizienz im Automobilbau*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- AIDA. (2015). *Verfahrensanleitung zur Eigenbewertung energetischer Eigenschaften von Industrierobotern im Karosseriebau*. Automatisierungsinitiative Deutscher Automobilisten.
- Alber, U. (2015). Innovative joining technologies in the new AUDI Q7: AUDI AG, Development - Joining Technology. Bad Nauheim.
- Alicke, K. (2005). *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken* (2. Aufl.). VDI-Buch. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Ashby, M. F. (Hrsg.). (2011). *Materials Selection in Mechanical Design (Fourth Edition)* (Fourth Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Awiszus, B., Bast, J., Dürr, H. & Matthes, K.-J. (2009). *Grundlagen der Fertigungstechnik* (4. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W. & Weiber, R. (2018). *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung* (15. Aufl.). doi:10.1007/978-3-662-12552-6
- Bayer, W. (2009). *Energie auf einen Blick. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2009*. Wiesbaden.
- Bechmann, A. (1978). *Nutzwertanalyse, Bewertungstheorie und Planung*. Beiträge zur Wirtschaftspolitik. Bern: Haupt Verlag.
- BMU. (2010). Produktbezogene Klimaschutzstrategien: Product Carbon Footprint verstehen und nutzen: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Zugriff unter http://bdi.eu/media/presse/publikationen/PCF-Leitfaden_100810_Online.pdf
- Bornschlegl, M. (2016). *Methods-Energy Measurement: Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau*. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. Bamberg: Meisenbach Verlag.
- Bornschlegl, M., Kreitlein, S., Bregulla, M. & Franke, J. (2015). A Method for Forecasting the Running Costs of Manufacturing Technologies in Automotive Production during the Early Planning Phase. *Procedia CIRP*, 26, 412–417. doi:10.1016/j.procir.2014.07.103
- Bornschlegl, M., Mueller, A., Bregulla, M., Mantwill, F. & Franke, J. (2016). Lebenszyklusbetrachtungen im Planungsprozess - Integration einer Lebenszyklusbetrachtung von Fertigungstechnologien im automobilen Karosseriebau. *wt Werkstattstechnik online*, 106(1/2), 89–93.
- Braess, H.-H. & Seiffert, U. (2013). *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. doi:10.1007/978-3-658-01691-3

- Bredow, M. v. (2014). *Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie*. Forschungsberichte / IWB. München: Utz.
- Breiting, A. & Knosala, R. (1997). *Bewerten technischer Systeme*. doi:10.1007/978-3-642-59229-4
- Buhmann, M. & Schön, M. (2009). Dynamische Standortbewertung – Denken in Szenarien und Optionen. In S. Kinkel (Hrsg.), *Erfolgsfaktor Standortplanung: In- und ausländische Standorte richtig bewerten* (S. 279–299). doi:10.1007/978-3-540-88471-2-19
- Bundesministerium der Finanzen. (2001). AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig Maschinenbau. juris - Fachportal Steuerrecht.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. (2008). *Untersuchung der Wirksamkeit des Programms zur Verbesserung der Materialeffizienz: Endbericht*. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2018). BDEW-Strompreisanalyse Mai 2018: Haushalte und Industrie. Zugriff unter https://www.bdew.de/media/documents/1805018_BDEW-Strompreisanalyse-Mai-2018.pdf
- Bürgel, H. D. & Zeller, A. (1997). Controlling kritischer Erfolgsfaktoren in Forschung und Entwicklung. *Controlling : Zeitschrift für erfolgsorientierte Unternehmenssteuerung*, 9(4), 218–225.
- Business Wire. (2008). Oliver Wyman Acquires Harbour Consulting, a Leader in the Global Automotive Industry and the Publisher of The Harbour Report™. Zugriff unter <https://www.businesswire.com/news/home/20080107005869/en/Oliver-Wyman-Acquires-Harbour-Consulting-Leader-Global>
- Chien, J. M., McKinstry, K. C., Baek, C., Horvath, A. & Dornfeld, D. (2012). Multi-objective Analysis on Joining Technologies. In *Dornfeld, D. A. und Linke, B. S. 2012 – Leveraging Technology for a Sustainable* (S. 287–292). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Choudry, S., Haass, S., Alber, U. & Landgrebe, D. (2018). A methodical approach for the technological assessment of joining technologies - optimized decision-making in car body development. In D. Marjanović, M. Storga, S. Škec, N. Bojčetić & N. Pavković (Hrsg.) (S. 225–236). Design Conference Proceedings. doi:10.21278/idc.2018.0449
- Choudry, S., Kaspar, J., Alber, U. & Landgrebe, D. (2018). Integration of an Assessment Methodology for the Selection of Joining Technologies in Lightweight Engineering. *Procedia CIRP*, 70, 217–222. doi:10.1016/j.procir.2018.02.034
- Choudry, S., Kaspar, J., Vielhaber, M. & Landgrebe, D. (2019). Concurrent Assessment of Material and Joining Technology in Lightweight Engineering. In D. Dao, R. J. Howlett, R. Setchi & L. Vlacic (Hrsg.), *Sustainable Design and Manufacturing 2018* (Bd. 130, S. 148–158). Smart Innovation, Systems and Technologies. doi:10.1007/978-3-030-04290-5
- Choudry, S., Müller, S., Alber, U., Riedel, F. & Landgrebe, D. (2018). A Multidimensional Assessment and Selection Methodology: Optimized Decision-making of Joining Technologies in Automobile Body Development. *Procedia Manufacturing*, 21, 281–288. doi:10.1016/j.promfg.2018.02.122
- Choudry, S., Sandmann, S. & Landgrebe, D. (2018). A Methodical Approach for an Economic Assessment of Joining Technologies under Risk – Optimized Decision-making in Automobile Body Development. *Procedia CIRP*, 69, 31–36. doi:10.1016/j.procir.2017.11.045

- Choudry, S., Steeb, S., Alber, U. & Landgrebe, D. (2018). A methodical approach for an ecological assessment of joining technologies — optimized decision-making in automobile body development. In *2018 7th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM)* (S. 27–32). doi:10.1109/icitm.2018.8333914
- Deutsche Bundesbank. (2017a). EZB-Zinssätze. Zugriff unter https://www.bundesbank.de/Redaktion/DE/Downloads/Statistiken/Geld_und_Kapitalmaerkte/Zinssaetze_Renditen/S510TTEZBZINS.pdf?__blob=publicationFile
- Deutsche Bundesbank. (2017b). Tarifverdienste, Gesamtwirtschaft Deutschland. Zugriff unter https://www.bundesbank.de/cae/servlet/StatisticDownload?tsId=BBK01.DJ7503&its_csvFor=mat=de&its_fileFormat=csv&mode=its
- Dilthey, U. (2006). *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1: Schweiß- und Schneidtechnologien* (3. Aufl.). VDI-Buch. doi:10.1007/3-540-33154-9
- DIN 31051. (2012). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Grundlagen der Instandhaltung. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 55350-11. (2003). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Begriffe zum Qualitätsmanagement. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN 8580. (2003). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.
- DIN 8593. (2003). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- DIN EN 60300-3-3. (2005). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 14040. (2009). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 14044. (2018). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 14067. (2017). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung. Berlin: Beuth Verlag.
- DIN EN ISO 14273. (2016). Deutsches Institut für Normierung e.V.: Widerstandsschweißen - Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen: Probenmaße und Verfahren für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln. Berlin: Beuth Verlag.
- Dombrowski, U., Palluck, M. & Boog, H. (2008). Erfahrungskurven in der Fabrikplanung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 103(10), 661–665. doi:10.3139/104.101339
- EeBGuide. (2018). EeBGuide Guidance Document Part A: Products: Operational guidance for Life Cycle Assessment studies of the Energy Efficient Buildings Initiative. Zugriff unter https://www.eebguide.eu/eeblog/wp-content/uploads/2012/10/EeBGuide-A-FINAL-PR_2012-10-29.pdf
- Elend, L.-E. (2012). Die Perfekte Mischung: Vision und Wirklichkeit. *ATZagenda*, 1(1), 16–21. doi:10.1007/s40357-012-0011-x
- Ellram, L. M. (1995). Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(8), 4–23. doi:10.1108/09600039510099928
- Esawi, A. & Ashby, M. (2004). Computer-based selection of joining processes: Methods, software and case studies. *Materials & Design*, 25. doi:10.1016/j.matdes.2004.03.002
-

- Europäische Union. (2012). *Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG: Energieeffizienz-Richtlinie*. Brüssel: Europäische Union.
- Feldhusen, J. & Grote, K.-H. (2013). *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung* (8. Aufl.).
- Fink, K. & Ploder, C. (2006). *Wirtschaftsinformatik als Schlüssel zum Unternehmenserfolg*. doi:10.1007/978-3-8350-9122-1
- Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S., ... Suh, S. (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21. doi:10.1016/j.jenvman.2009.06.018
- Fleischer, J., Weismann, U., Nesges, D. & Wawerla, M. (2004). Life-Cycle-Performance in der Produktionstechnik. *VDI-Z Integrierte Produktion*, 146(10), 87–90.
- Fodor, J. & Roubens, M. (1994). *Fuzzy Preference Modelling and Multicriteria Decision Support: Valued binary relations* (14. Aufl.). doi:10.1007/978-94-017-1648-2
- Freter, H. (2008). *Markt- und Kundensegmentierung: Kundenorientierte Markterfassung und -bearbeitung* (2. Aufl.). Kohlhammer-Edition Marketing. Stuttgart: Kohlhammer.
- Friedrich, H. E. (2013). *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Imprint: Springer Vieweg.
- Geißdörfer, K. (2009). *Total cost of ownership (TCO) und life cycle costing (LCC): Einsatz und Modelle: ein Vergleich zwischen Deutschland und USA*. Controlling und Management. Berlin: LIT Verlag.
- Geissdörfer, K., Gleich, R. & Wald, A. (2009). Standardisierungspotentiale lebenszyklusbasierter Modelle des strategischen Kostenmanagements. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 79(6), 693–715. doi:10.1007/s11573-009-0256-7
- Georgii, H.-O. (2015). *Stochastik: Einführung in die Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik* (5. Aufl.). De Gruyter Studium. Berlin: De Gruyter.
- Goecke, S.-F. & Krautwald, A. (2012). *[ENERWELD]: Effiziente thermische Fügeverfahren* (1. Aufl.). Ressourceneffizienz in der Produktion. Brandenburg: Fachhochsch., Fertigungs- und Produktionstechnik, Maschinenbau im Fachbereich Technik.
- Götze, U. (2010). *Kostenrechnung und Kostenmanagement* (5. Aufl.). Springer-Lehrbuch. doi:10.1007/978-3-642-11824-1
- Granta Design. (2018). CES Selector. Cambridge, UK: Material Universe. Zugriff unter <https://www.grantadesign.com/>
- Haag, H. (2013). *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.
- Haldi, J. & Whitcomb, D. (1967). Economies of Scale in Industrial Plants. *Journal of Political Economy*, 75(4, Part 1), 373–385. doi:10.1086/259293
- Hänle, U., Kalke, S., Lehnert, F. & Seethaler, L. (2002). Metallische Leichtbauwerkstoffe und Fertigungstechnologien im Automobilbau. *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 104(3), 268–275. doi:10.1007/BF03224397
- Hayes, B. (2006). COMPUTING SCIENCE GAUSS'S Day of Reckoning. *American Scientist*, 94(3), 200–205. Zugriff unter <http://www.jstor.org/stable/27858762>
- Heitsch, J.-U. (2000). *Multidimensionale Bewertung alternativer Produktionstechniken: Ein Beitrag zur technischen Investitionsplanung*. Berichte aus der Produktionstechnik. Aachen: Shaker.

- Henning, F. & Moeller, E. (2011). *Handbuch Leichtbau: Methoden, Werkstoffe, Fertigung*. München: Carl Hanser Verlag.
- Homburg, C. (2012). *Marketingmanagement: Strategie - Instrumente - Umsetzung - Unternehmensführung* (4. Aufl.). Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Ilschner, B. & Singer, R. F. (2010). *Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik: Eigenschaften, Vorgänge, Technologien* (5. Aufl.). Springer-Lehrbuch. doi:10.1007/978-3-642-01734-6
- Jiménez-González, C., Kim, S. & Overcash, M. R. (2000). Methodology for developing gate-to-gate Life cycle inventory information. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(3), 153–159. doi:10.1007/BF02978615
- Kaspar, J., Choudry, S., Landgrebe, D. & Vielhaber, M. (2018). Concurrent and geometry-dependent selection of material and joining technology — An initial utility-based systematic decision-making tool. In *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)* (S. 1–8). doi:10.1109/syscon.2018.8369549
- Kaspar, J., Choudry, S. & Vielhaber, M. (2018). Concurrent Selection of Material and Joining Technology – Holistically Relevant Aspects and Its Mutual Interrelations in Lightweight Engineering. *Procedia CIRP*, 72, 780–785. doi:10.1016/j.procir.2018.03.093
- Kaspar, J. & Vielhaber, M. (2016). Cross-Component Systematic Approach for Lightweight and Material-Oriented Design. In C. Boks (Hrsg.), *Proceedings of NordDesign 2016* (S. 332–341). Bristol, United Kingdom: The Design Society.
- Keitel, D. (2007). *Die Kapitalwertmethode und die Grenzen Ihrer Anwendung: Investition und Investitionsentscheidung - Praktische Anwendung der Verfahren*. Grin Verlag.
- Kellens, K., Dewulf, W., Overcash, M., Hauschild, M. Z. & Duflou, J. R. (2012). Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)—CO2PE! initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). Part 1: Methodology description. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(1), 69–78. doi:10.1007/s11367-011-0340-4
- Kinkel, S. (Hrsg.). (2009). *Erfolgsfaktor Standortplanung: In- und ausländische Standorte richtig bewerten*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Klöpffer, W. & Grahl, B. (2012). *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf* (Nachdruck). Weinheim: WILEY-VCH.
- Klug, F. (2010). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau*. VDI. Heidelberg: Springer.
- Krebs, P. (2012). *Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten*. Forschungsberichte IWB. München: Herbert Utz Verlag.
- Krones, M., Pfefferkorn, F. E. & Shrivastava, A. (2014). Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessen – Überblick über Methoden und praktische Anwendung. In E. Müller (Hrsg.), *Produktion und arbeitswelt 4.0* (S. 227–236). TU Chemnitz.
- Kruska, M. (2002). *Bewertung der Energieeffizienz von Industriebetrieben am Beispiel der Milchverarbeitung*. Berichte aus der Energietechnik. Aachen: Shaker.
- Kühnapfel, J. B. (2014). *Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb*. doi:10.1007/978-3-658-05509-7
- Lange, K. (2010). *Numerical Analysis for Statisticians* (2. Aufl.). Statistics and Computing. New York: Springer New York.
-

- LeBacq, C., Brechet, Y., Shercliff, H., Jeggy, T. & Salvo, L. (2002). Selection of joining methods in mechanical design. *Materials & Design*, 23(4), 405–416. doi:10.1016/S0261-3069(01)00093-0
- Matyas, K. (2016). *Taschenbuch Instandhaltungslogistik: Qualität und Produktivität steigern* (6. Aufl.). doi:10.3139/9783446446168
- Meintrup, D. & Schäffler, S. (2005). *Stochastik: Theorie und Anwendungen*. Statistik und ihre Anwendungen. Berlin: Springer.
- Meschut, G., Janzen, V. & Olfermann, T. (2014). Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-Material Lightweight Car Body Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(5), 1515–1523. doi:10.1007/s11665-014-0962-3
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63(2), 81–97. doi:10.1037/h0043158
- Moser, U. (1986). *Kostenrechnung mit SuperCalc*. doi:10.1007/978-3-663-13229-5
- Neugebauer, R. (2013). *Handbuch Ressourcenorientierte Produktion*. doi:10.3139/9783446436237.fm
- Neumann, K. & Morlock, M. (2002). *Operations Research* (2. Aufl.). München: Hanser Fachbuch.
- Ostermann, F. (2014). *Anwendungstechnologie Aluminium*. doi:10.1007/978-3-662-43807-7
- Parment, A. (2016). *Die Zukunft des Autohandels: Vertrieb und Konsumentenverhalten im Wandel - Wie das Auto benutzt, betrachtet und gekauft wird*. Wiesbaden: Gabler.
- Patton, J., Economy, P. & Fowler, M. (2014). *User story mapping: Discover the whole story, build the right product* (1. Aufl.). Beijing: O'Reilly.
- Pieverling, J. v. (2003). *Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling*. Forschungsberichte / IWB. München: Herbert Utz Verlag.
- Pohl, J. (2014). *Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen*. Forschungsberichte IWB. München: Utz.
- Porst, R. (2014). *Fragebogen: Ein Arbeitsbuch* (4. Aufl.). Lehrbuch. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Prüß, H., Stechert, C. & Vietor, T. (2010). *Methodik zur Auswahl von Füge-technologien in Multimaterialsystemen: Design for X: Beiträge zum 21. DfX-Symposium, September 2010*. 21. DfX-Symposium. Hamburg: TuTech-Verl.
- Raubold, U. (2011). *Lebenszyklusmanagement in der Automobilindustrie* (1. Aufl.). doi:10.1007/978-3-8349-6613-1
- Reinhardt, S. (2014). *Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung*. Forschungsberichte IWB. München: Herbert Utz Verlag.
- Reinhart, G., Bredow, M. v. & Karl, F. (2009). Bewertung von risikobehafteten Fahrzeugprojekten in der Automobilindustrie mit Hilfe des „NPV at Risk“. In *wt Werkstattstechnik* (Bd. 4, S. 267–272).
- Riedel, F. (2004). *Möglichkeiten der Optimierung von punktförmigen, form- und kraftschlüssigen Feinblechverbindungen*. Schriftenreihe Füge-technik / Schweiß-technik. Chemnitz: Shaker-Verlag.
- Rosenkranz, F. & Mißler-Behr, M. (2005). *Unternehmensrisiken erkennen und managen: Einführung in die quantitative Planung*. Berlin: Springer.

- Roth, R., Clark, J. & Kelkar, A. (2001). Automobile bodies: Can aluminum be an economical alternative to steel? *JOM*, 53(8), 28–32. doi:10.1007/s11837-001-0131-7
- Schenk, M. (2010). *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. doi:10.1007/978-3-642-03949-2
- Schrack, D. (2015). *Nachhaltigkeitsorientierte Materialflusskostenrechnung: Anwendung in Lieferketten, der Abfallwirtschaft und Integration externer Effekte* (1. Aufl.). Wiesbaden: Gabler Verlag. Zugriff unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-11302-5>
- Schweiger, S. (2009). *Lebenszykluskosten optimieren: Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern*. (1. Aufl.). doi:10.1007/978-3-8349-8094-6
- Shonkwiler, R. W. (2013). *Finance with Monte Carlo*. Springer Undergraduate Texts in Mathematics and Technology. New York: Springer.
- Sojka, W. (2001). *Einführung in die Analysis* (1. Aufl.). Stuttgart: Books on Demand.
- Sproesser, G. (2017). *Umweltbewertung und Ökoeffizienz beim Metall-Schutzgasschweißen von Dickblechverbindungen*. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Stephan, H. (2007). *Bewertungsmethodik für Fertigungsverfahren im Karosseriebau aus Sicht des betrieblichen Umweltschutzes*. Schriftenreihe WAR. Inst. WAR.
- Stillwell, W. G., Seaver, D. A. & Edwards, W. (1981). A comparison of weight approximation techniques in multiattribute utility decision making. *Organizational Behavior & Human Performance*, 28(1), 62–77. doi:10.1016/0030-5073(81)90015-5
- Taguchi, G., Chowdhury, S. & Wu, Y. (2004). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. doi:10.1002/9780470258354
- Taha, H. A. & Schmidt, J. W. (1975). *Integer Programming: Theory, Applications, and Computations* (1. Aufl.). Academic Press. Zugriff unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=919898>
- Tölle, J. & Schmidt, H. (2009). *Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Bewertung von Schwingfestigkeitsversuchen mit gefügten Stahlfeinblechen in Abhängigkeit des Versagensverhaltens*. FAT-Schriftenreihe, Forschungsvereinigung Automobiltechnik.
- Tzeng, G.-H. & Huang, J.-J. (2012). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ude, J. (2010). *Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke: Ein Bewertungsansatz unter Berücksichtigung multikriterieller Zielsysteme, Dynamik und Unsicherheit* (1. Aufl.). Forschungsberichte aus dem wbk, Institut für Produktionstechnik Universität Karlsruhe. Aachen: Shaker.
- Uetz, H. U. (1986). *Bewertung der Instandhaltung von Fertigungssystemen in der technischen Investitionsplanung*. doi:10.1007/978-3-642-82693-1
- Umweltbundesamt. (2018). *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2017: Aktualisierung auf Basis von Climate Change 15/2017*. Dessau-Roßlau.
- United Nations. (2015). *Framework Convention on Climate Change: Conference of the Parties, Twenty-first session: Draft decision -/CP.21: Adoption of the paris agreement*. Paris: 2015 United Nations Climate Change Conference (COP 21).
- VDA. (2017). *Mehr Klimaschutz durch eine bessere und umfassendere CO2-Regulierung: Position zur CO2-Regulierung Pkw post 2020*: Verband der Automobilindustrie e.V. Zugriff unter <https://www.vda.de/de/themen/umwelt-und-klima/co2->
-

- regulierung-bei-pkw-und-leichten-nfz/ausgestaltung-der-co2-regulierung-fuer-die-zeit-nach-2020.html
- VDI-Richtlinie 2225 Blatt 3. (1998). Verein Deutscher Ingenieure: Technisch-wirtschaftliche Bewertung. Düsseldorf: VDI Verlag.
- VDI-Richtlinie 2232. (2004). Verein Deutscher Ingenieure: Methodische Auswahl fester Verbindungen - Systematik, Konstruktionskataloge, Arbeitshilfen. Düsseldorf: VDI Verlag.
- VDI-Richtlinie 2884. (2005). Verein Deutscher Ingenieure: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC). Berlin: Beuth Verlag.
- VDI-Richtlinie 4600. (2012). Verein Deutscher Ingenieure - Kumulierter Energieaufwand (KEA): Begriffe und Berechnungsgrundlagen. Berlin: Beuth Verlag.
- VDMA 34160. (2006). Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Berlin: Beuth Verlag.
- Wemhöner, N. (2006). *Flexibilitätsoptimierung zur Auslastungssteigerung im Automobilrohbau*. Berichte aus der Produktionstechnik. Aachen: Shaker-Verlag.
- Werner, H. (1997). *Strategisches Forschungs- und Entwicklungs-Controlling*. doi:10.1007/978-3-322-95417-6
- Westermann, G. (2012). *Kosten-Nutzen-Analyse: Einführung und Fallstudien*. ESV Basics. Berlin: Erich Schmidt.
- Westphal, J. R. (2001). *Komplexitätsmanagement in der Produktionslogistik: Ein Ansatz zur flussorientierten Gestaltung und Lenkung heterogener Produktionssysteme* (1. Aufl.). Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Yelle, L. E. (1979). The Learning Curve: Historical Review and Comprehensive Survey. *Decision Sciences*, 10(2), 302–328. doi:10.1111/j.1540-5915.1979.tb00026.x
- Zangemeister, C. (2014). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen* (5. Aufl.). Norderstedt: Books on Demand.

Anhang

A – Validierung des Anwendungsfalls: Übersicht der Systeme

Füge- system	Ist-Zustand		Soll-Zustand (vor Potential-Modell)		Soll-Zustand (nach Potential-Modell)		
	Nr.	Typ	FP	Typ	FP	Typ	FP
	1.1	FT A	20	FT A	27	FT A	27
	1.2	FT F	8	FT F	8	FT F	8
	2.1	FT A	19	FT A	4	-	-
	2.2	FT A	26	FT D	34	FT D	38
	3.1	FT F	55	FT F	55	FT F	55
	3.2	FT A	11	FT A	11	FT A	11
	3.3	FT B	10	FT C	15	-	15
	3.4	FT A	11	FT A	11	FT A	11
	3.5	FT B	10	FT C	16	-	16
	3.6	FT A	35	FT A	35	FT A	35
	4.1	FT B	19	FT C	24	FT C	26
	4.2	FT B	17	FT B	2	-	-
	4.3	FT B	12	-	-	-	-
	4.4	FT F	8	FT F	8	FT F	8
	5.1	FT A	25	FT A	25	FT A	25
	5.2	FT B	20	FT C	31	FT C	31
	5.3	FD D	7	FT D	7	FT D	7
	6.1	FT A	22	FT A	22	FT A	22
	6.2	FT A	6	FT A	6	FT A	6

B – Aufgaben- und Rollenbeschreibung in *optimate*

	Administrator	Planung	Entwicklung	Technologie-entwicklung
Rechte				
Ergebnisse einsehen	✓	✓	✓	✓
Baugruppen einlesen	✓	✓	✓	✗
Projektdaten eingeben	✓	✓	✗	✗
Prozessdaten eingeben	✓	✓	✗	✗
Werkstoff hinzufügen	✓	✗	✓	✗
MDK zuordnen	✓	✗	✓	✗
Flanschbreite hinzufügen	✓	✗	✓	✗
Fügapunkte spezifizieren	✓	✗	✓	✗
Anforderungen hinzufügen	✓	✗	✓	✗
Fügefolge abbilden	✓	✓	✗	✗
Rechte verteilen	✓	✗	✗	✗
Technologie hinzufügen	✓	✗	✗	✓
Kriterien anpassen	✓	✗	✗	✓

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation sind in Kooperation mit der AUDI AG von 2016 bis 2018 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher sowie inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgelisteten Abschlussarbeiten entstanden. Die Arbeiten haben verschiedene Fragestellungen zur Bewertung und Auswahl von Fügetechnologien im Karosseriebau untersucht, deren Ergebnisse in Auszügen in das vorliegende Dokument mit eingeflossen sind. Der Autor dankt den Studenten für das Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende(r)	Forschungsschwerpunkt
Sarah Haaß März 2017	Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien im Karosserieleichtbau: Entwicklung eines Bewertungskonzepts mit Fokus auf nicht monetäre Einflusskriterien
Simon Steeb Oktober 2017	Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien im Karosserieleichtbau: Optimierte Entscheidungsfindung durch Berücksichtigung ökologischer Einflussfaktoren
Steffen Sandmann Januar 2018	Multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien im Karosserieleichtbau: Optimierte Entscheidungsfindung durch Berücksichtigung ökonomischer Einflussfaktoren unter Risiko
Dennis Johann April 2018	Multidimensionale Auswahl von Fügetechnologien im Karosserieleichtbau: Ein werkstoff- und konstruktionsorientierter Ansatz zur optimierten Entscheidungsfindung
Anna Jundt Juni 2018	Konzeption einer Webanwendung für die multidimensionale Bewertung von Fügetechnologien im Karosserieleichtbau
Philipp Bleicher September 2018	Programmierung einer webbasierten Anwendung zur multidimensionalen Bewertung von Fügetechnologien im Karosseriebau
Ferdinand Greinacher November 2018	Nachhaltige Integration einer Bewertungsmethodik zur optimierten Entscheidungsfindung von Fügetechnologien im Entwicklungsprozess

